

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky



**Analýza tras obnovy přenosové soustavy vzhledem k
Ferrantiho jevu**

**Analysis of transmission system recovery paths regarding
Ferranti effect**

2020

Bc. Jan Kelnar

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jan Kelnar**
Studijní program: N2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika
Téma: **Analýza tras obnovy přenosové soustavy vzhledem k Ferrantiho jevu**
Analysis of transmission system recovery paths regarding Ferranti effect

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Teoretický rozbor vedení a funkce přenosové soustavy České republiky
2. Principy simulačních výpočtů programu MODES a EMTP
3. Problematika obnovy přenosové soustavy a zdrojů se schopností startu ze tmy.
4. Napěťové jevy typické pro obnovovací trasy a ostrovní provoz
5. Tvorba výpočetního modelu obnovovacích tras VE Orlík – E Chvaletice a PVE Dlouhé Stráně – E Chvaletice
6. Analýza napěťových poměrů na obou obnovovacích trasách a jejich porovnání
7. Závěr – zobecnění výsledků

Seznam doporučené odborné literatury:


Hradílek Z. : Elektroenergetika, skriptu VŠB Ostrava 1992
Hase Y. : Handbook of power systems engineering, John Wiley & Sons, Ltd, 2007
Kolektiv autorů : Řízení a stabilita elektrizační soustavy, AEM, 2013

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.**


Datum zadání: 01.09.2018

Datum odevzdání: 30.04.2020



prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry





prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 25. května 2020



.....
podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval prof. Ing. Stanislavu Ruskovi, CSc. za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této diplomové práce. Také velké poděkování patří odborníkům z firmy ČEPS, a.s. zejména Ing. Jiří Helbich a doc. Ing. Karel Máslo, CSc. V neposlední řadě bych také rád poděkoval své rodině, přátelům a přítelkyni, kteří mě při vytváření této práce podporovali a bez jejichž pomoci bych tuto práci nemohl dokončit.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá podpůrnou funkcí startu ze tmy vodní elektrárny Orlík a přečerpávací elektrárny Dlouhé Stráně pro tepelnou elektrárnu Chvaletice. Vodní elektrárna Orlík již certifikace pro start ze tmy má, a tak slouží jako referenční. Poskytování služby startu ze tmy přečerpávací vodní elektrárnou Dlouhé Stráně se uvažovalo již mnohem dříve, v letech 2001 až 2004 vznikly studie a byla provedena také zkouška, která ovšem neměla požadované výsledky. V programu MODES jsou obě trasy namodelovány a při simulaci se sledují dynamické vlastnosti sítě, při najíždění jednotlivých zdrojů vlastní spotřeby tepelné elektrárny Chvaletice. Taktéž v programu ATP-EMTP jsou obě trasy namodelovány, simulovány a sledují se elektromagnetické přechodové děje.

Klíčová slova

Vodní elektrárna Orlík, Přečerpávací vodní elektrárna Dlouhé Stráně, Tepelná elektrárna Chvaletice, MODES, ATP-EMTP, Start ze tmy,

Abstract

This diploma thesis deals with the blackstart of Orlík hydroelectric power plant and Dlouhé Stráně pumped-storage hydroelectricity for Chvaletice Power Station. The Orlík hydroelectric power plant already has black start certification so it serves as a reference. There was some thought about black start of Dlouhé Stráně pumped-storage hydroelectricity before. In the years 2001 to 2004 were created studies and also was performed black start test but the results was not good. Both paths have been created as models in MODES program for monitoring dynamic properties and also in the ATP-EMTP program for monitoring electromagnetic transients.

Key words

Orlík hydroelectric power plant, Dlouhé Stráně pumped-storage hydroelectricity, Chvaletice Power Station, MODES, ATP-EMTP, Black Start

Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotka	Význam symbolu
P_K	W	Ztráty nakrátko
u_K	-	Poměrné napětí nakrátko při jmenovitém stavu
p_{KON}	-	Podíl aktuálního a jmenovitého počtu závitů na straně koncového uzlu
M_{MECH}	Nm	Mechanický moment poháněného zařízení
M_{EL}	Nm	Elektrický moment rozoru
T_{MECH}	s	Mechanická časová konstanta pohonu
Z_{Tn}	Ω	Jmenovitá impedance
U_{TnKON}	V	Napětí na straně koncového uzlu
S_{Tn}	VA	Jmenovitý výkon
i_0	A	Poměrný proud
M_{AS}	Nm	Asynchronní tlumící moment generátoru
k_A	-	Koeficient měřítka
Ω_M	$rad \cdot s^{-1}$	Mechanická kruhová rychlost
Ω_0	$rad \cdot s^{-1}$	Synchronní kruhová rychlost
k_N	-	Převodní koeficient mezi výkon generátoru a turbíny
$\cos\varphi_n$	-	Jmenovitý účinník
k_{ZAT}	-	zatěžovatel
P_{El}	W	Elektrický výkon
s_R	-	Skluz rotoru
A_M, B_M	-	Parametr závislosti zatěžovacího momentu a skluzu
s_U	Hz	Poměrná odchylka frekvence
X_τ	Ω	Náhradní reaktance
u_k	%	Napětí nakrátko
S_{Gn}	VA	Jmenovitý výkon generátoru
$S_{\tau n}$	VA	Jmenovitý výkon blokového transformátoru
$U_{\tau n}$	V	Jmenovité napětí transformátoru

U_{Gn}	V	Jmenovité napětí generátoru
s_G	-	Skluz
δ	-	Absolutní zátěžný úhel
s_U	Hz	Odchylka frekvence od jmenovité hodnoty
N_T	W	Mechanický výkon turbíny vztažený na jmenovitý
ΔP_G	W	Elektrický výkon generátoru vztažený na jmenovitý zdánlivý výkon generátoru
U_B	V	Budící napětí
X_d	Ω	Synchronní rázová reaktance
X_d'	Ω	Přechodná reaktance v podélné ose
X_d''	Ω	Rázová reaktance v podélné ose
X_q	Ω	Synchronní reaktance v příčné ose
X_q'	Ω	Přechodná reaktance v příčné ose
J	$kg \cdot m^2$	Moment setrvačnosti
T_M	s	Mechanická časová konstanta vztažená na jmenovitý zdánlivý výkon

Seznam použitých zkratek

Zkratka	Význam
JE	Jaderná elektrárna
VE	Vodní elektrárna
TE	Tepelná elektrárna
PVE	Vodní přečerpávací elektrárna
JETE	Jaderná elektrárna Temelín
VS	Vlastní spotřeba
EOR	Vodní elektrárna orlík
ČEPS	Česká přenosová soustava

Obsah

Seznam ilustrací	- 13 -
Seznam tabulek	- 15 -
Úvod.....	- 16 -
1 Teoretický rozbor vedení a funkce přenosové soustavy České republiky.....	- 17 -
1.1 Funkce přenosové soustavy.....	- 17 -
1.2 Investiční plán ČEPS.....	- 19 -
1.3 Vývoj přenosové soustavy	- 21 -
2 Principy simulačních výpočtů programu MODES a EMTP	- 22 -
2.1 MODES.....	- 22 -
2.1.1 Grafika.....	- 22 -
2.1.2 MODMAN	- 22 -
2.1.3 Projekty a případy	- 22 -
2.2 EMTP-ATP	- 23 -
2.2.1 Integrované simulační moduly	- 23 -
2.2.2 Integrované podpůrné programy	- 23 -
2.2.3 Vestavěné komponenty	- 25 -
2.2.4 Výstup	- 25 -
2.2.5 Historie	- 26 -
3 Problematika obnovy přenosové soustavy a zdrojů se schopností startu ze tmy	- 27 -
3.1 Požadavky zajištění napájení vlastní spotřeby JE	- 30 -
3.2 Definice startu ze tmy	- 31 -
3.3 Elektrárny a jejich poskytovatelé služby startu ze tmy	- 32 -
3.3.1 Jaderná elektrárna Dukovany	- 32 -
3.3.2 Jaderná elektrárna Temelín.....	- 32 -
3.4 Obnova přenosové soustavy	- 32 -
4 Napěťové jevy typické pro obnovovací trasy a ostrovní provozy	- 33 -
4.1 Ferrantiho jev	- 33 -
4.2 Ferorezonance	- 34 -
4.3 Samobuzení	- 36 -

5	Tvorba výpočetního modelu obnovovacích tras	37 -
5.1	MODES.....	37 -
5.1.1	Generátor	37 -
5.1.2	Rovnice synchronního stroje	37 -
5.1.3	Budicí systémy	38 -
5.1.4	Transformátor a vedení.....	39 -
5.1.5	Turbína	39 -
5.1.6	Regulátor turbíny.....	40 -
5.1.7	Zátěž	40 -
5.2	ATP - EMTP	41 -
5.2.1	Synchronní generátor	41 -
5.2.2	Transformátor	41 -
5.2.3	Vedení	42 -
5.2.4	Zátěž	42 -
6	Analýza napěťových poměrů na obou obnovovacích trasách a jejich porovnání	43 -
6.1	Model obnovovací trasy VE Orlík - T Chvaletice.....	43 -
6.1.1	MODES	43 -
6.1.2	APT - EMTP	47 -
6.2	Model obnovovací trasy PVE Dlouhé Stráně - TE Chvaletice	50 -
6.2.1	MODES	51 -
6.2.2	ATP - EMTP	54 -
7	Závěr	59 -
	Použitá literatura	I
	Seznam příloh.....	III

Seznam ilustrací

Obrázek 1.1:	<i>Modelové schéma elektrizační soustavy [1]</i>	- 17 -
Obrázek 1.2:	<i>Schéma přenosové soustavy [1]</i>	- 18 -
Obrázek 1.3:	<i>Struktura EMTP-ATP [5]</i>	- 24 -
Obrázek 1.4:	<i>Schéma funkce programu [6]</i>	- 25 -
Obrázek 1.5:	<i>Propojení ES ČR se zahraničím na úrovni 400 kV [8]</i>	- 27 -
Obrázek 1.6:	<i>Zjednodušené jednopólové schéma rozběhu vlastní spotřeby JE Dukovany-</i>	28
	-	
Obrázek 1.7:	<i>Deisलगenerátor</i>	- 30 -
Obrázek 1.8:	<i>Základní schéma vlastní spotřeby JE</i>	- 31 -
Obrázek 1.9:	<i>T-článek [13]</i>	- 33 -
Obrázek 1.10:	<i>Zjednodušený T-článek [13]</i>	- 34 -
Obrázek 1.11:	<i>Fázový diagram chodu naprázdno [13]</i>	- 34 -
Obrázek 1.12:	<i>Sériový RLC obvod [13]</i>	- 35 -
Obrázek 1.13:	<i>Schéma regulátoru buzení</i>	- 39 -
Obrázek 1.14:	<i>Schéma turbíny</i>	- 40 -
Obrázek 1.15:	<i>Schéma regulátoru otáček</i>	- 40 -
Obrázek 1.16:	<i>Modely synchronních generátorů</i>	- 41 -
Obrázek 1.17:	<i>Modely transformátorů</i>	- 42 -
Obrázek 1.18:	<i>Modely vedení</i>	- 42 -
Obrázek 1.19:	<i>Obnovací trasa VE Orlik - TE Chvaletice</i>	- 43 -
Obrázek 1.20:	<i>Průběh frekvence generátoru VE Orlik</i>	- 44 -
Obrázek 1.21:	<i>Průběh napětí při sestavování trasy VS ECH</i>	- 45 -
Obrázek 1.22:	<i>Rozběh kouřového ventilátoru - zavřené lopatky a pak otevření</i>	- 45 -
Obrázek 1.23:	<i>Rozběh napáječky</i>	- 46 -
Obrázek 1.24:	<i>3fázový průběh fázového napětí na VE Orlik</i>	- 47 -
Obrázek 1.25:	<i>Odchylka úhlové rychlosti generátoru VE Orlik</i>	- 47 -
Obrázek 1.26:	<i>Průběhy fázového napětí 1.fáze na vedeních</i>	- 48 -
Obrázek 1.27:	<i>Průběh proudu v rozvodně Čechy Střed</i>	- 49 -
Obrázek 1.28:	<i>Ferrantiho jev na vedeních 220 kV</i>	- 49 -
Obrázek 1.29:	<i>Obnovovací trasa PVE Dlouhé Stráně - TE Chvaletice</i>	- 50 -
Obrázek 1.30:	<i>Průběh frekvence generátoru PVE Dlouhé Stráně</i>	- 52 -
Obrázek 1.31:	<i>Průběh napětí při rozběhu VS ECH</i>	- 52 -
Obrázek 1.32:	<i>Rozběh kouřového ventilátoru - zavřené lopatky a pak otevření</i>	- 53 -
Obrázek 1.33:	<i>Rozběh napáječky</i>	- 53 -
Obrázek 1.34:	<i>3fázový průběh napětí na PVE Dlouhé Stráně</i>	- 55 -
Obrázek 1.35:	<i>Průběh napětí 1.fáze na vedeních 400kV</i>	- 55 -
Obrázek 1.36:	<i>Průběh napětí 2.fáze na vedeních 400kV</i>	- 56 -
Obrázek 1.37:	<i>Průběh napětí 3.fáze na vedeních 400kV</i>	- 56 -
Obrázek 1.38:	<i>Odchylka úhlové rychlosti generátoru VPE Dlouhé Stráně</i>	- 57 -

Obrázek 1.39:	<i>Průběh proudu v rozvodně Týnec</i>	- 58 -
Obrázek 1.40:	<i>Průběh proudu v rozvodně Krasíkov</i>	- 58 -
Obrázek 1.41:	<i>Modely obnovovacích tras VE Orlik - TE Chvaletice a VPE Dlouhé Stráně - TE Chvaletice v programu ATP-EMTP</i>	IV

Seznam tabulek

<i>Tabulka 1.1:</i>	<i>Přenosová soustava České republiky (k 31.12.2009).....</i>	<i>- 18 -</i>
<i>Tabulka 1.2:</i>	<i>Vzniklé výpadky a jejich rozsah [1]</i>	<i>- 19 -</i>
<i>Tabulka 1.3:</i>	<i>Seznam nových a posilovaných vedení a nových rozvodů [1]</i>	<i>- 20 -</i>
<i>Tabulka 1.4:</i>	<i>Scénář rozběhu pohonů VS ECHV</i>	<i>- 44 -</i>
<i>Tabulka 1.5:</i>	<i>Scénář spínání jednotlivých bloků vlastní spotřeby</i>	<i>- 51 -</i>

Úvod

Celá elektrizační síť je postavena na rovnováze vyrobené elektrické energie a jejím odběru. Elektrickou energii ve velkém množství zatím nelze uskladnit. Při rozsáhlém výpadku elektrické energie, ať už vinou přírodních vlivů či lidského faktoru, je velká pravděpodobnost rozpadu sítě. Takový to rozpad sítě může způsobit rozsáhlé škody. Zastavení či omezení dodávek plynu, vody a ropy. Při neobnovení sítě do doby, kterou by dokázaly pokrýt záložní zdroje elektrické energie (diesel generátory), by nastaly i výrazné problémy v nemocnicích, důležitých institucích, jiných potřebných zařízeních a také v průmyslu. Například nefunkční čerpací stanice pohonných hmot, na kterých je závislý Integrovaný záchranný systém. Také zvýšená kriminální činnost doprovázena rabováním a v neposlední řadě jisté finanční ztráty. Všechny tyto popsane faktory se již udály při výpadech elektrické energie v minulosti, a to například v Indii či USA.

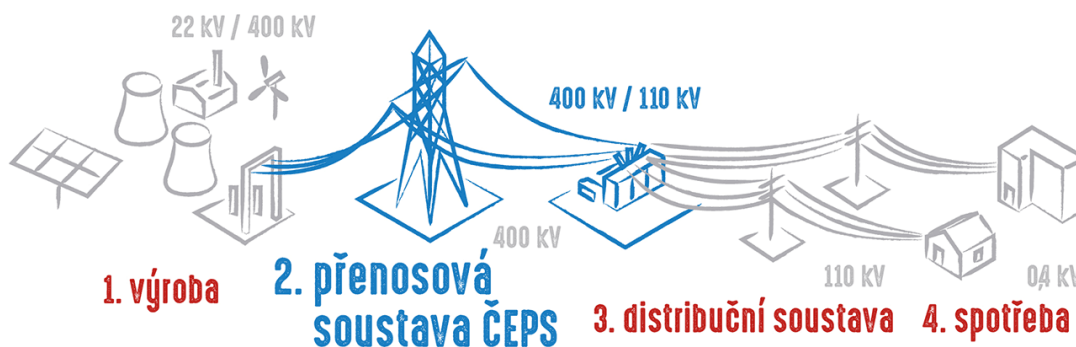
Vyrovňování výkonové bilance má na starosti dispečink provozovatele přenosové soustavy společnost ČEPS, a.s. Pravděpodobnost nevyváženosti výkonové bilance se zvyšuje s přechodem říditelných zdrojů energie, kterými jsou uhelné a jaderné elektrárny, na neříditelné zdroje energie jako jsou větrné a fotovoltaické elektrárny. Rozvojové země nesou s sebou zvýšené riziko blackoutu díky narůstající poptávce elektrické energie. Pokud by tedy nastal rozpad sítě, musí mít společnost ČEPS, a.s. prostředky k obnovení sítě. Právě mezi těmito prostředky patří start ze tmy a ostrovní režim, které jsou zařazeny do plánu obnovy. Aby elektrárny mohly poskytnout podpůrnou službu start ze tmy, musí mít danou certifikaci, kterou získají při patřičné zkoušce. Před samotnou zkouškou je potřeba zpracovat studie. Právě tyto studie mají za úkol simulovat obnovovací trasy pro zjištění elektromechanických a elektromagnetických jevů. Pro simulování těchto tras a sledování přechodných jevů slouží například programy MODES a ATP-EMTP.

Cílem této diplomové práce je simulování dvou obnovovacích tras a sledování přechodových jevů. První zkoumaná trasa začíná na vodní elektrárně Orlík, pokračuje přes rozvodny Milín, Čechy Střed a Opočíněk až do tepelné elektrárny Chvaletice. Druhá obnovovací trasa začíná na přečerpávací vodní elektrárně Dlouhé Stráně a pokračuje přes rozvodny Krasíkov a Týnec do tepelné elektrárny Chvaletice.

1 Teoretický rozbor vedení a funkce přenosové soustavy České republiky

1.1 Funkce přenosové soustavy

Přenosová soustava zajišťuje přenos elektrické energie z výroby (jaderné, tepelné, vodní, větrné a solární elektrárny) k distribuční soustavě (rozvodny 400/110 kV a 220/110 kV) a také přenos elektrické energie mezi jednotlivými státy. Vznikající elektrická energie v alternátoru elektrárny má velikost jednotek kV, avšak proud zde dosahuje desítek kA. Kdybychom chtěli přenášet takto velký proud, museli bychom vodiče dimenzovat na velmi velký průřez. Důsledkem by byly velké ztráty na vedení, jelikož podle Joulova zákona jsou tyto ztráty úměrné druhé mocnině proudu. Docházelo by také k mechanickému namáhání, proto je v elektrárnách vzniklá elektrická energie transformována na vyšší napětíovou hladinu 400 kV či 220 kV. Vedení o první zmiňované napětíové hladině tvoří hlavní "páteřní" přenosovou síť, kdežto trasy druhé napětíové hladiny mají dnes již převážně úlohu záložního a doplňkového vedení.



Obrázek 1.1: Modelové schéma elektrizační soustavy [1]

Součástí těchto dvou napětíových hladin 400 kV a 220 kV je také 42 rozvodnů a 75 transformátorů a jsou zároveň součástí mezinárodního propojení Evropy. Přenosová soustava ČR je napojena přeshraničními vedeními na přenosové soustavy všech našich čtyřech sousedních států.

(jaderné elektrárny). Problémem jsou provozování některých obnovitelných zdrojů (větrné a fotovoltaické elektrárny). Jejich provoz je obtížně regulovatelný, závisí na přírodních podmínkách a jsou zcela nezávislé na okamžité spotřebě. Pokud tedy fotovoltaické či větrné elektrárny výkon v ten daný moment nedodávají, zvyšují tak nároky na přenos a vedení výkonu právě z těchto elektráren a ze záložních zdrojů.

Dispečerské řízení soustavy je více složitější, právě díky měnící se konfiguraci elektrizační soustavy, a také schopnost přenosové soustavy dopravovat vyrobenou elektrickou energii má rostoucí tendenci.

Typ spotřeby elektrické energie se mění. Odstraňují se rozdíly v sezónní poptávce pomocí rozvoje mezinárodního obchodu s elektrickou energií, růstu životní úrovně, změny klimatu či restrukturalizace průmyslu.

Proto jsou plánované odstávky pro údržbu, opravy či rekonstrukce přenosových tras i výrobních zdrojů složitější. K velkému výpadku, takzvanému "blackoutu", může dojít ve výjimečných případech kdy se setká více takových faktorů.

Otázka bezpečnosti zásobování elektrickou energií je rozebírána všemi úrovněmi nadnárodních profesí obsahující profesní sdružení elektroenergetického a elektrotechnického průmyslu ale i v mezinárodní politice. Zvyšováním spolehlivosti přenosu se zabývají soustavně již několik let operátoři přenosových soustav v Evropě ve spolupráci s regulačními orgány členských zemí a Evropskou komisí. [1]

Tabulka 1.2: *Vzniklé výpadky a jejich rozsah [1]*

Území (stát)	Datum	Rozsah výpadku
Londýn	Srpen 2003	500 tisíc osob
Dánsko a jižní Švédsko	Září 2003	5 miliónů osob
Itálie	Září 2003	56 miliónů osob
Švédsko	Leden 2005	341 tisíc domácností
Moskva	Květen 2005	10 miliónů osob
Německo, Francie, Itálie, Belgie, Španělsko, Portugalsko, Rakousko, Chorvatsko	Listopad 2006	15 miliónů domácností

1.2 Investiční plán ČEPS

Také provozovatel přenosové soustavy ČR společnost ČEPS se řídí těmito základními strategiemi. Avšak prioritou jsou pro ni investice do zařízení přenosové soustavy. Rozvíjení vnitřního trhu EU či zvyšování úrovně spolehlivosti se nedá realizovat bez modernizace zařízení přenosové soustavy, bez rozsáhlého odstraňování úzkých míst v soustavě nebo bez zvýšení

kapacity sítě. Investiční plán společnosti ČEPS počítá s posílením vedení na trase z Polska do Rakouska. U přeshraničního propojení a přenosových vedení ze severočeských hnědouhelných elektráren východním směrem sleduje zvýšení kapacit. ČEPS má v plánu do roku 2023 vystavět nové vedení, posílit kapacity některých stávajících vedení a přechod stanic přenosové soustavy na dálkové ovládání, přičemž už zbývá jen rozvodna Kočín. Tyto změny by měly mít zásadní vliv na přenosové parametry celé sítě. Počítá se se zvýšením přenosové kapacity, která by měla stačit pro připojování nových (obnovitelných) zdrojů do budoucna. Konečným důsledkem bude zvýšení bezpečnosti zásobování spotřebitelů elektrickou energií.

[1]

Tabulka 1.3: Seznam nových a posilovaných vedení a nových rozvodů [1]

Název stavby	Délka km	Začátek	Ukončení výstavby
V403/803 Prosenice - Nošovice, zdvojení stávajícího vedení	80	2021	2023
V406/V407 Kočín - Mírovka, výstavba nového vedení	121	2021	2025
V409/V410 - smyčka do rozvodny Praha Sever	13	2025	2025
V411/811 Hradec - Výškov, zdvojení stávajícího vedení	46	2023	2024
V413 Řeporyje - Mírovka, navýšení přenosové schopnosti	146	2025	2026
V415/V416 Chodov - Čechy Střed, I. etapa - zdvojení stávajícího vedení	8	2021	2021
V415/V495 Chodov - Čechy Střed, II. etapa - zdvojení stávajícího vedení	28	2022	2022
V443/V449 - smyčka do rozvodny Dětmárovice	1,2	2025	2025
V450/V428 Výškov - Babylon, zdvojení stávajícího vedení	73	2020	2022
V451/V448 Babylon - Bezděčín, zdvojení stávajícího vedení	54	2019	2020
V456/V803 - smyčka do rozvodny Kletné	29	2024	2025
V460 Nošovice - Albrechtice, navýšení přenosové schopnosti	16,5	2020	2020
V475/V477 - smyčka do rozvodny Milín	0,7	2023	2023
V487/V488 Verněřov - Vítkov, výstavba nového vedení	83	2021	2023
V490/V491 Přestice - Vítkov, výstavba nového vedení	87	2019	2021
Rozvodna Dětmárovice, nová rozvodna 420 kV	-	2023	2025
Rozvodna Hradec, komplexní rekonstrukce	-	2021	2030
Rozvodna Chrást, komplexní rekonstrukce	-	2021	2024
Rozvodna Kočín, komplexní rekonstrukce	-	2017	2023
Rozvodna Milín, nová rozvodna 420 kV	-	2022	2023
Rozvodna Praha-Sever, nová rozvodna 400 kV	-	2023	2025
Rozvodna Prosenice, komplexní rekonstrukce	-	2019	2024
Rozvodna Slavětice, komplexní rekonstrukce	-	2024	2032
Rozvodna Vítkov, nová rozvodna 420 kV	-	2018	2020

1.3 Vývoj přenosové soustavy

Roku 1878 a v Moravské Třebové se začala poprvé využívat elektrická energie k osvětlení tkalcovny lnu za pomoci obloukových lamp, to ovšem přenosová soustava nebyla třeba, jelikož se vyrobená elektřina spotřebovala přímo v místě výroby. S postupem času, kdy přibývalo objektů vyžadující elektrickou energii, bylo zapotřebí ji již rozvádět z výrobního místa směrem k odběrným místům. To bylo řešeno zejména vrchním vedením o různých napěťových hladinách, ovšem jednalo se stále jen o lokální rozvod elektrické energie.

Dalším krokem byl vznik tzv. Městské elektrárny vyrábějící ale i distribuující elektrickou energii do obcí pro veřejné osvětlení. Postupem času byly na vzniklou síť připojeny domácnosti. Jako první město s elektrárnou byla Praha - Žižkov v roce 1889, kdy v místní plynárně bylo nainstalováno dynamo.

Do doby, než byl schválen projekt výstavby první elektrárny vyrábějící střídavý proud (rok 1897) vyráběly všechny postavené elektrárny pouze stejnosměrný proud. Roku 1900 byl uveden do provozu první třífázový generátor v pražských Holešovicích.

Se vznikem Československé republiky roku 1918, bylo již 11% měst a obcí elektrifikováno, v nichž žilo 34% obyvatelstva. Vydáním zákona roku 1919 o soustavné elektrizaci státu bylo nejdůležitějším impulzem ke vzniku přenosové a distribuční soustavy známou v dnešní podobě. Tento zákon například vyhrazuje síťové napětí na hodnotu 3x380/220 V s frekvencí 50 Hz a napětí primárních distribučních sítí na 22 kV a 110 kV.

[2]

Roku 1951 došlo k zprovoznění vůbec prvního vedení 220 kV na trase Výškov - Opočíněk. O 7 let později došlo k zahájení výstavby vedení 400 kV a transformoven 400/220 kV v Hradci u Kadaně a v Prosenicích. O rok později tedy 1959, byla připojena rozvodna 220 kV v Hradci u Kadaně a na trase Výškov - Hradec-Zwönitz bylo uvedeno do provozu dvojité vedení 220 kV, pomocí kterého spolupracovaly naše energetické systémy se systémy bývalé Německé demokratické republiky. Také tentýž rok se připojilo do provozu vedení 220 kV na trase Lískovec - Jaworzno pro společnou spolupráci s Polskem. V dalších devíti letech bylo vybudováno vedení 220 kV do délky 2019 km a vedení 400 kV do délky 809 km. V 80. letech 20. století je "páteřní síť" již prakticky hotova.

[3]

2 Principy simulačních výpočtů programu MODES a EMTP

2.1 MODES

Jedná se o síťový simulátor, který dokáže monitorovat dynamickou odezvu dané elektrizační soustavy při určitých síťových změnách. Charaktery změn:

- Poruchová - jedná se o výpadky a zkraty na vedení nebo o výpadky elektrárenských bloků
- Provozní - jde o změny zatížení sítě nebo o činnost obsluhy na lokální i centrální úrovni

Pro tyto účely je program vybaven knihovnou dynamických modelů jednotlivých prvků elektrizační soustavy. Dokáže vyobrazit časové průběhy proměnných veličin a nadefinovat tzv. scénář, což je časový sled zásahů. Výsledky simulace, kterými jsou časové průběhy proměnných veličin, umožňuje uložit do uživatelského výstupního souboru. Umí kontrolovat, zda nedojde k překročení mezí u proměnných sítě. Zprávy vznikající o průběhu výpočtu zapisuje do souboru. Analyzuje stavy sítě. U vybraných proměnných umí vypočítat střední kvadratické odchylky a vypočítat veličiny zkratového proudu. Zadáním časového sledu zásahu vytvoříme výpočty na dynamickém modulu již zmíněný tzv. "Scénář"

2.1.1 Grafika

Zprostředkovává interakci uživatele s programem. Oznamuje poslední zásah, který byl proveden. Umožňuje zobrazit časový průběh 7 proměnných v poměrných hodnotách, a to až ve 4 grafech. Informuje o okamžitých hodnotách proměnných a o jménu otevřeného projektu.

2.1.2 MODMAN

Jedná se o uživatelské rozhraní, ve kterém se orientujeme v uložených případech a projektech. Můžeme případy a projekty také spravovat nebo vytvářet nové. Dovoluje tlačítkem z menu "Spust" spouštět programy, upravovat typové parametry dynamických modelů Editorem modelů nebo pomocí menu či tlačítek umožňuje přístup k výstupním souborům. Můžeme editovat:

- Formuláře skrze dialogy a tvorbu variací
- Chod sítě pro vytváření více variant za pomoci Editoru chodů
- Databázi pro vytváření modifikací za pomoci Editorem modelů

2.1.3 Projekty a případy

Uživatel specifikuje a uloží do archívu případ, který je tvořen sadou vstupních souborů jednotlivých výpočtů. Tento případ má jméno, jméno autora, datum vytvoření a datum změn tzn. má svou vlastní identitu. Pokud máme takových případů více, vytvářejí tím projekt.

Takovýto projekt může vzniknout jestliže:

- Vytvoříme nový projekt
- Upravíme současný projekt
- Importujeme vzniklý projekt

[4]

2.2 EMTP-ATP

Je akronymem pro Electromagnetic Transients Program - Alternative Transients Program (Program elektromagnetických přechodů). V tomto programu může uživatel zkonstruovat a simulovat různé elektrické schéma pro sledování elektromechanických i elektromagnetických přechodných dějů elektroenergetických systémů. Dokáže řešit obvody skrze algebraické parciální a diferenciální rovnice. Program ATP pracuje s programovacím jazykem FORTRAN, jde o složení prvních tří písmen slova formula a prvních čtyř písmen slova translator. Výpočet je uskutečněn pomocí zjednodušené metody Newton-Raphson.

2.2.1 Integrované simulační moduly

MODELS - Jedná se o popisovací jazyk, který se používá k tvorbě vlastních objektů či uživatelem zadaných elektrických a kontrolních komponentů. Umí zpracovat časové či frekvenční simulační výsledky.

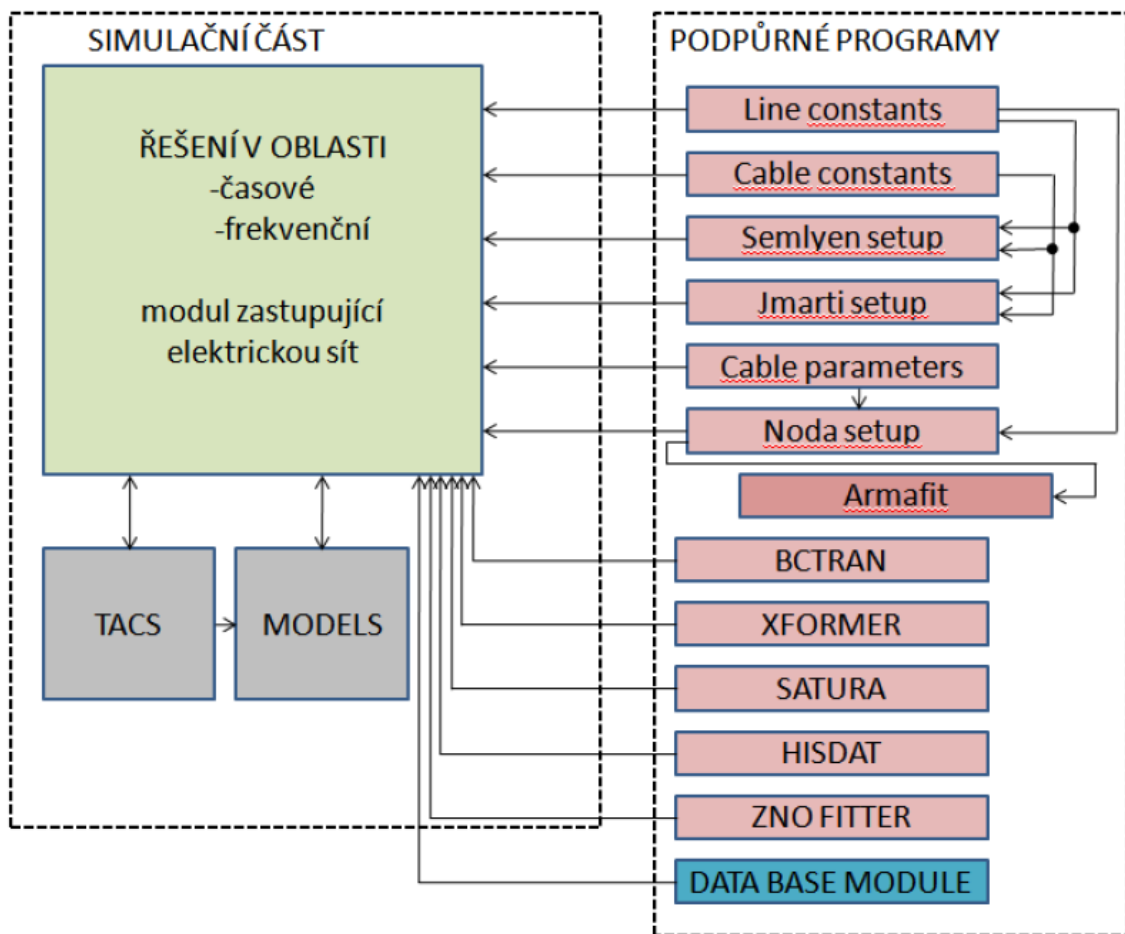
TACS - Jde o simulační modul, jenž dokáže simulovat kontrolní systémy v časové oblasti. Elektrická síť a TACS spolupracuje pomocí výměny signálů. Těmito signály mohou být například uzlové napětí, proud a poloha vypínačů, časově proměnné odpory či napětí a proud zdrojů. V dnešní době má širší využití, avšak vyvinut byl pro simulaci řízení vysokonapětových jednosměrných převodníků. Dokáže simulovat jiskřiště při omezení proudu v bleskojistkách, elektrický oblouk (poruchy výkonových vypínačů), budící systémy synchronních strojů, silová elektronika a pohony.

2.2.2 Integrované podpůrné programy

Usnadňují výpočty přechodných dějů.

- LINE CONSTANTS - Výpočet parametrů venkovního vedení ve frekvenční oblasti jako například parametry modelu CPDL (constant parameters distributed line), parametry náhradního π -článku, impedanci na jednotku délky.
- CABLE CONSTANTS - Výpočet elektrických parametrů silových kabelů.
- SEMLYEN SETUP - Tvorba modelů venkovních a kabelových sítí závislých na frekvenci. Používá se modální teorie pro nahrazení nesouměrných vedení v časové oblasti
- JMARTI SETUP - Tvorba modelů vedení a kabelů, které jsou závislé na frekvenci vyšších řádů

- BCTTRAN - Derivace maticového nebo lineárního modelu trojfázových nebo jednofázových transformátorů s ohledem na změřené hodnoty naprázdno a nakrátko
- XFORMER - Náhrada jednofázových, dvoufázových a třífázových vinutí lineární derivací na způsob RL spřažených větví.
- SATURA - Derivace křivky magnetického indukčního toku z VA charakteristiky nebo z proudově přírůstkové indukční charakteristiky.
- ZNO FITTER - Derivace VA charakteristik, aproximované skupinou exponenciálních funkcí, skutečných nelineárních prvků.
- DATA BASE MODULE - Rozčleňování sítě na jednotlivé části tzv. moduly.



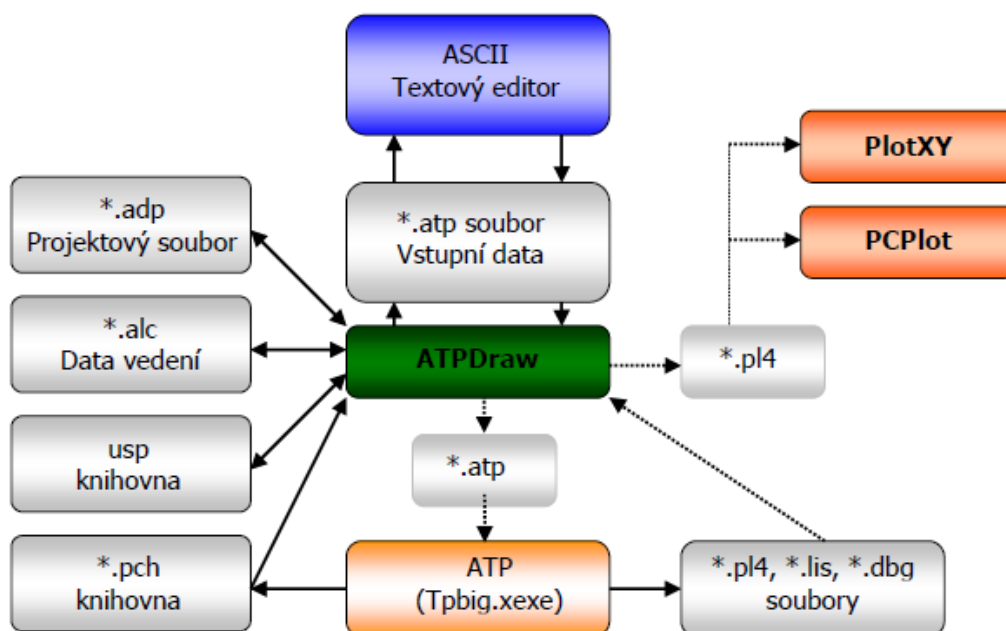
Obrázek 1.3: Struktura EMTP-ATP [5]

[5]

2.2.3 Vestavěné komponenty

Umožňují nahradit reálné existující prvky. Dělí se na

- Lineární větve - rezistor, kapacitor, induktor, RLC obvod, RLC třífázový obvod zapojený do hvězdy nebo do trojúhelníka
- Nelineární větve - rezistor, induktor, kapacitor
- Vedení se soustředěnými parametry
- Vedení s rozprostřenými parametry
- Spínače - dioda, tyristor, triak
- Zdroje - ideální střídavé nebo stejnosměrné, generátory skoků
- Točivé stroje - synchronní, asynchronní nebo stejnosměrný motor
- Transformátory - ideální nebo reálný
- Uživatelem zadané komponenty



Obrázek 1.4: Schéma funkce programu [6]

2.2.4 Výstup

Jelikož je program ATP jenom výpočtovým programem, využívá se programu ATPDraw, který je grafickým, myší ovládaným preprocesorem na platformě Microsoft Windows. Rovněž ATPDraw umožňuje zadávat náležité hodnoty jednotlivých prvků obvodu a následně vygenerovat program s výstupním datovým souborem.

Vizualizaci výstupních informací můžeme v programech PlotXY a PCPlot. Data lze nahrát z několika souborů s koncovkou ".pl4" a následně i jednotlivé soubory umožňuje porovnat.

Hlavním znakem programu PlotXY je jeho jednoduchost obsluhy, přičemž obsahuje veškeré důležité funkce.

Editovat a vytvářet výstupní soubor je možno skrze textový editor Programmer's File Editor (PFE).

[6]

2.2.5 Historie

Doktor Hermann W. Dommel vytvořil přechodný program na technické Univerzitě v Mnichově. V roce 1966 se přestěhoval do BPA (Bonneville Powe administration) v USA, kde začal vyvíjet obecně analytický přechodný program a originální verzi EMPT, kterou dokončil v roce 1968. Roku 1972 se přidal k BPA Scott-Mayer a o rok později Dommel opouští BPA. Od té doby se práce na programu EMTP velmi zrychlila. Do týmu ScottMayera se přidal Semlyen, Ametani, Brandwajn a Dube. Společně v roce 1981 vytvořili program EMTP Mode 31, který se nijak podstatně neliší od aktuální verze.

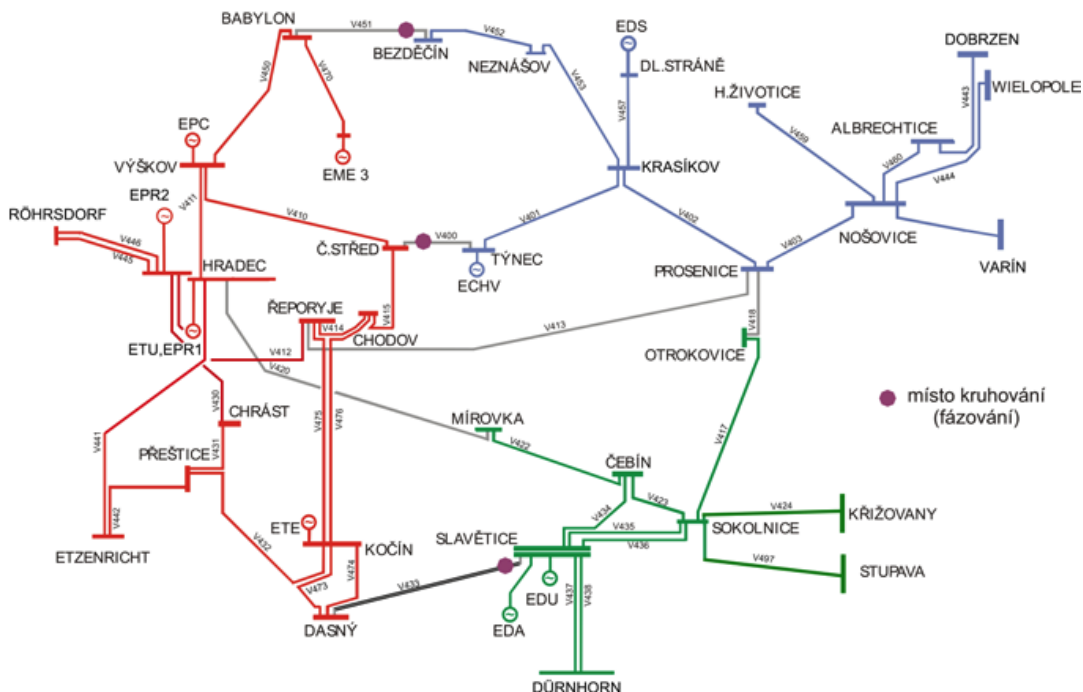
[7]

3 Problematika obnovy přenosové soustavy a zdrojů se schopností startu ze tmy

Provozovatel přenosové soustavy společnost ČEPS má povinnost podle zákona zaručovat bezpečnost a spolehlivost provozu přenosové soustavy. Pokud nastane v elektrizační soustavě jakýkoliv problém, má za úkol učinit opatření, které zabrání rozpadu sítě. V tomto smyslu byl vytvořen tzv. "Plán obrany proti šíření poruch v přenosové soustavě". Tento plán obsahuje prostředky a hlavní principy pro zabezpečení bezpečného provozu, což jsou:

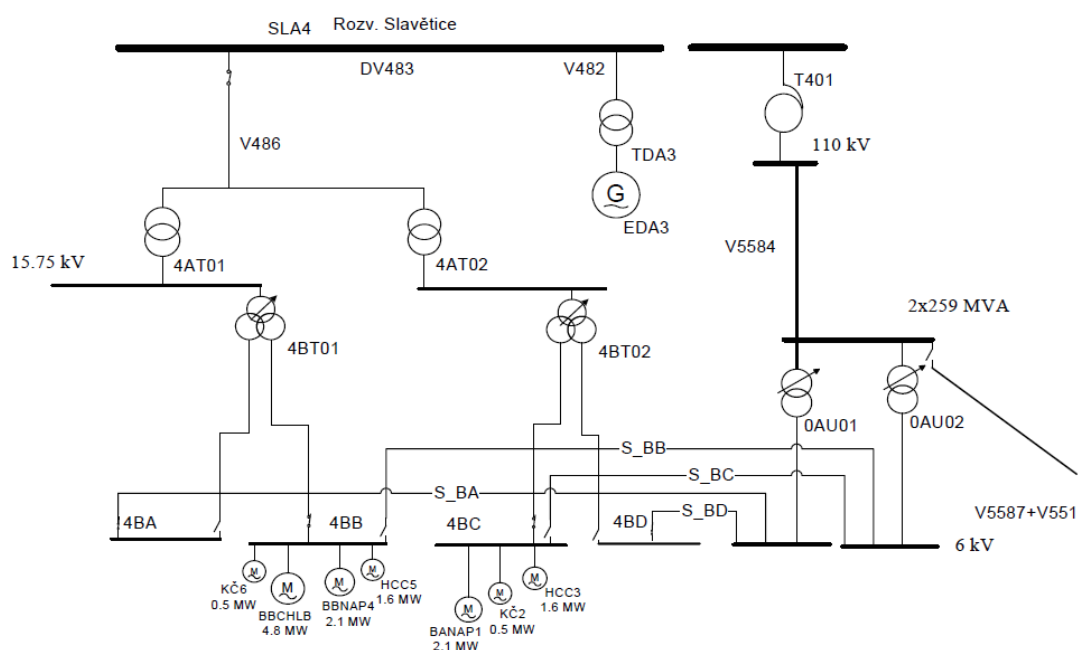
- Ovládání propustnosti sítě
- Zajištění proti přetížení
- Zajištění proti postupnému šíření poruchy
- Zajištění proti úbytku či vzrůstu frekvence
- Zajištění proti kývání
- Zajištění proti úbytku či vzrůstu napětí
- Zajištění proti ztrátě synchronismu

I když existují tato opatření zabezpečující odolnost dané soustavy proti stavům a poruchám, jenž se dají předvídat, stále prostřednictvím nepříznivých okolností může nastat částečný nebo úplný rozpad soustavy tzv. "blackout". Velká část soustavy nebo dokonce celá soustava je bez napětí. To může nastat jedině velmi zřídka. Pokud by tato situace skutečně nastala, má ČEPS zpracován a připraven Plán obnovy, který stanovuje postupy zajišťující nejkratší čas obnovy a zároveň nejmenší ekonomické ztráty zasažených odběratelů.



Obrázek 1.5: Propojení ES ČR se zahraničím na úrovni 400 kV [8]

Jelikož naše elektrizační soustava je tzv. "vnitřní síť" využívá se proto našich zahraničních partnerů, s kterými jsme elektricky propojeni, při obnově napájení. Tato vedení jsou realizované 10 vedeními 400 kV a 6 vedeními 220 kV. Na západ je to s německými společnostmi Tennet DE a 50Hertz, na severu s polskou společností PSE-Operator, východ patří slovenské společnosti SEPS a na jihu s Rakouským Verbund APG. V tomto případě se předpokládá zasažení poruchou pouze elektrizační soustavy ČR, což znamená že poskytnutý výkon zahraničních partnerů neohrozí vlastní funkčnost a stabilitu jejich soustav.



Zpracovány jsou také způsoby obnovení elektrizační sítě ČR z tuzemských zdrojů, aby obnova nebyla závislá pouze na zahraničních partnerech. Vodní elektrárny nepotřebují pro své obnovení provozu vnější napájení, proto jsou využívány pro tuto situaci.

- 28 -

Pokud jde o střední a menší zdroje elektrické energie s výkonem desítek MW či teplárny, jejich význam se zvyšuje s narůstajícím rizikem blackoutu. Při plošném výpadku bude právě na těchto zdrojích záviset napájení základní infrastruktury.

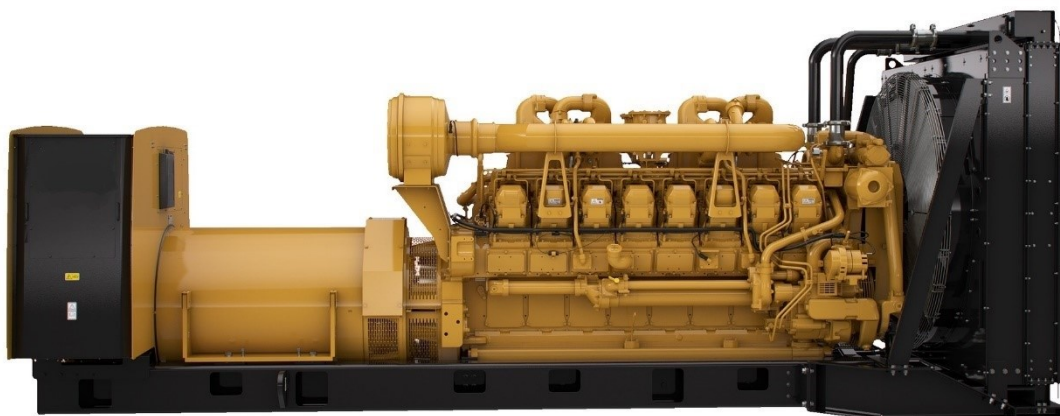
Při návrhu nouzového napájení je důležité schéma napájení vlastní spotřeby bloku, seznam všech pohonů a dalších technologií. Vhodným řešením u starších instalací je změření skutečné spotřeby jednotlivých pohonů a také znalost postupu spouštění dílčích pohonů. Většina pohonů je konstruována na napájecí napětí 400 V, ovšem můžou se objevit motory, které potřebují ke své funkci napětí 6 kV. Tento fakt může způsobovat problém a je potřeba stanovit napěťovou hladinu záložního zdroje.

Rychlost spouštění záložního zdroje, při startu teplárny ze tmy je jiná, než je tomu u klasických záložních zdrojů, které jsou používány například v nemocnicích. Na rozdíl od právě zmiňované nemocnice, kde musí dojít k okamžitému automatickému najetí, není nutné zapnutí bloku ihned po výpadku. Start ze tmy se provede až při delším výpadku či nastávajícím možném nebezpečí jako je zamrznutí horkovodní a parovodní soustavy.

Při startu ze tmy bývá požadavek na zvýšené napětí, které se používá pro kompenzaci úbytku napětí, jelikož už ten se nedá zanedbat při jmenovitém proudu dosahujícího řádu tisíce ampérů.

Obvykle největší spotřebiče jako jsou napájecí čerpadlo, zauhlovací linka či kouřové ventilátory, pracují s jmenovitým napětím 6 kV, tím pádem i záložní zdroj musí být připojen na tuto napěťovou hladinu. Abychom mohli napájet současně celý blok z napěťové hladiny 6kV, musí být zajištěna určitá technická zabezpečení, mezi které patří zablokování nedůležitých odběrů či napájení pouze určitých částí. Díky těmto zabezpečení se předejde výpadku záložního zdroje při zapínání bloku.

Největší prioritou při obnovení napájení je dobíjení záložních zdrojů a dalších zařízení, které jsou potřebné při provozu rozvodu. V druhé části dojde k obnovení napájení pro zauhlovací trasy a zásobníky uhlí. V případě dostačující zásoby uhlí pro zapnutí kotle bude následovat jeho postupné najíždění. Při dostatečné teplotě výstupní páry z kotle se prohřeje turbína, zapne se turbogenerátor a dojde k jeho přifázování, k záložnímu zdroji napětí. Po úspěšném přifázování se vlastní spotřeba bloku převede ze záložního zdroje na turbogenerátor a záložní zdroj může být poté odstaven. [8]



Obrázek 1.7: *Deiselgenerátor*

[9]

3.1 Požadavky zajištění napájení vlastní spotřeby JE

Dodávka elektrické energie do rozvodů napájených VS musí být zajištěna za všech okolností. Uskutečňuje se to třemi systémy napájení:

- **Pracovní zdroje**

Jedná se o základní dráhu napájení, která při normální i abnormálním provozu musí být schopna dodávat energii. V případě JETE jsou to čtyři blokové rozvodny napájené přes odbočkové transformátory. Každé ze dvou sekundárních vinutí napájí jednu rozvodnu.

- **Rezervní zdroje**

Pokud dojde k ztrátě napájení z pracovních zdrojů, napájí se spotřebiče VS z rezervních zdrojů. Tento systém musí být z toho důvodu zcela nezávislý na provozních zdrojích.

JETE má oddělené 110kV venkovní vedení z rozvodny Kočín zvlášť ke každému výrobnímu bloku, kde je vedení rozděleno na dvě části a přivedeno na transformátory rezervního napájení. Dále vedení pokračuje do čtyřech 6kV rozvodů reverzního napájení, z nichž vedou 4 vývody na 4 blokové rozvodny.

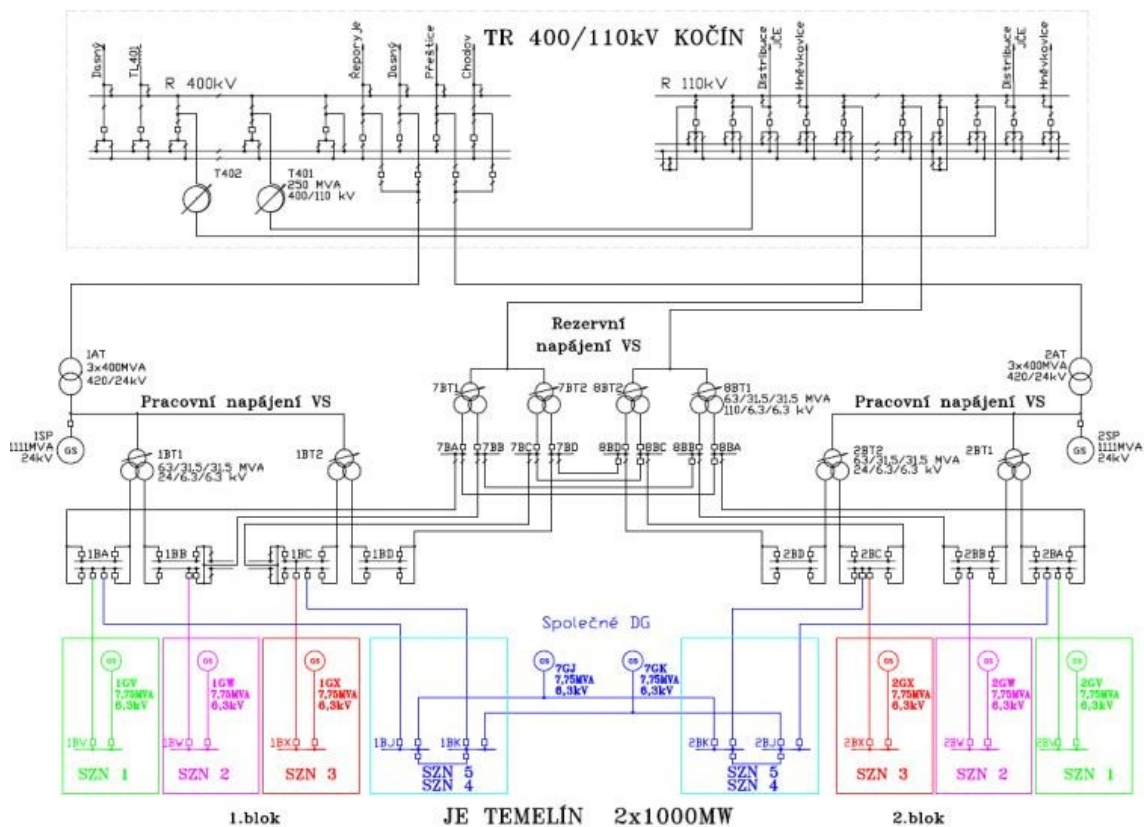
- **Nouzové zdroje**

V případě nedostupnosti pracovních i reverzních zdrojů jsou k nouzovému napájení spotřebičů určených k dochlazování reaktoru použity nouzové zdroje.

Prvním takovýmto zdrojem je systém baterií určených k napájení nejdůležitějších spotřebičů s malým příkonem. Výstupem baterií je stejnosměrné napětí 220 V

O napájení střídavým proudem ostatních důležitých spotřebičů se stará druhý zdroj a tím jsou diesel generátory. Každý ze dvou bloků má tři diesel generátory bezpečnostních systémů

mající přímý vliv na jadernou bezpečnost a společné dva diesel generátory s nepřímým vlivem na jadernou bezpečnost. Ovšem tyto dva společně s diesel generátory mohou mít vliv na bezpečnost osob a důležitá zařízení.



Obrázek 1.8: Základní schéma vlastní spotřeby JE

[10]

3.2 Definice startu ze tmy

Jde o schopnost bloku, který dokáže dosáhnout jmenovitých otáček, jmenovitého napětí, a také se přidat k síti se schopností ji napájet v ostrovním režimu, bez působení jakéhokoli vnějšího zdroje napětí. Tato schopnost je velice nezbytná u vybraných bloků pro opětovné dodání elektrické energie po celkovém nebo neúplném rozpadu sítě.

[11]

3.3 Elektrárny a jejich poskytovatelé služby startu ze tmy

3.3.1 Jaderná elektrárna Dukovany

Podpůrnou službu start ze tmy poskytuje dálkově ovládaná vodní elektrárna Mohelno, která umožňuje napájet vlastní spotřebu vodní elektrárny Dalešice. Generátory vodní elektrárny Dalešice pracující v separátním provozu. Napájí skrze odbočkové a blokové transformátory a bloková vedení jednotlivé pohony vlastní spotřeby elektrárny Dukovany přes rozvodnu Slavětice. Tyto pohony jsou spouštěny postupně. Na rozdíl tedy od ostrovního režimu, kdy se více generátorů zapojují paralelně, pracuje v této části sítě pouze jeden generátor. Frekvence a napětí je důležité při rozběhu velkých spotřebičů (čerpadla chladící vody) udržovat v dovolených mezích.

Druhou možností napájení je z vodní elektrárny Vranov přes rozvodnu Znojmo a dále přes rozvodnu Slavětice nebo rozvodnu Oslavany.

3.3.2 Jaderná elektrárna Temelín

Generátor vodní elektrárny Lipno napájí skrze rozvodnu Dasný, rozvodnu Kočín a distribuční soustavu 110 kV vlastní spotřebu jaderné elektrárny Temelín.

Vodní elektrárna Orlík poskytuje službu start ze tmy skrze přenosovou soustavu, přes rozvodny Milín, Tábor a Kočín a umožňuje napájet vlastní spotřebu jaderné elektrárny Temelín.

Také malá vodní elektrárna Hněvkovice dokáže skrze rozvodnu Kočín po distribuční lince 110 kV napájet zvolené čerpadlo elektrárny Temelín, ale není uzpůsobena ke stratu ze tmy v současné době.

3.4 Obnova přenosové soustavy

Jedná se o zapnutí bloků bez vnějšího zdroje napětí a výkonu. Proces, během kterého dochází k obnovování provozu po částečném nebo úplném rozpadu soustavy je složen:

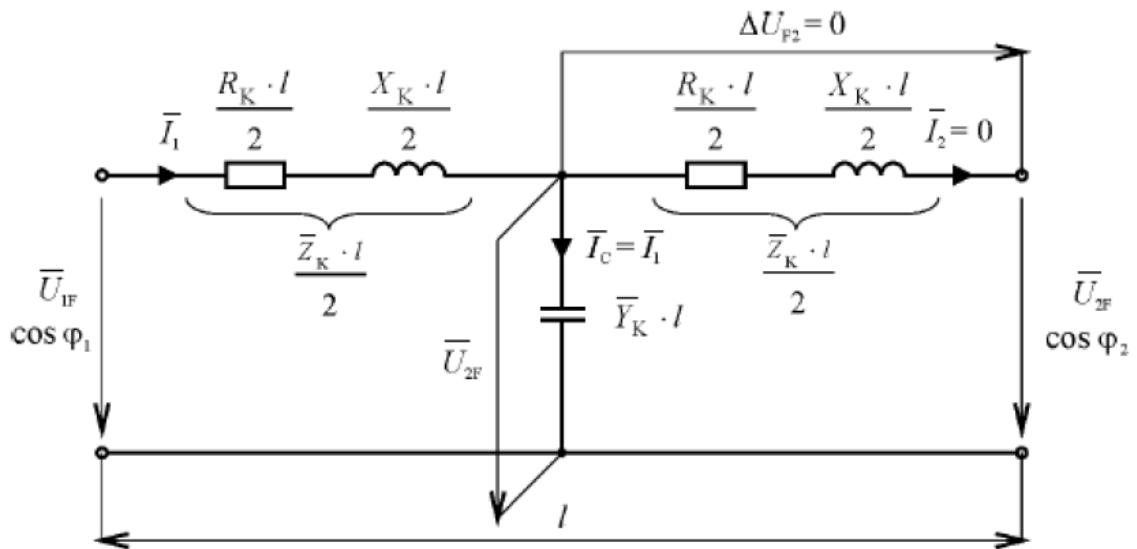
- Start bloků bez napětí ze sítě - start ze tmy
- Obnova napětí v síti s následným připojením uživatelů k síti podle předem daných priorit
- Ostrovní chod dané části sítě
- Postupné sfázování ostrovních provozů

[12]

4 Napěťové jevy typické pro obnovovací trasy a ostrovní provoz

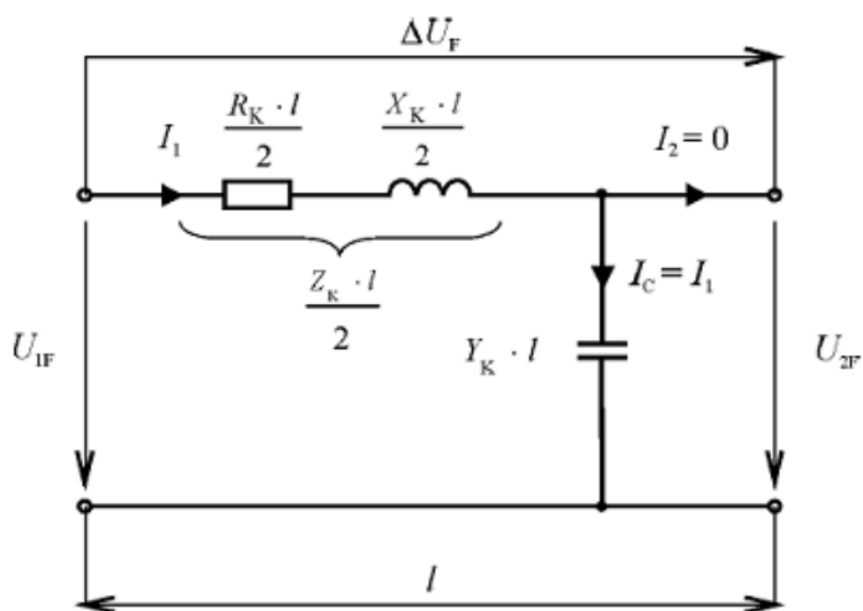
4.1 Ferrantiho jev

Je to jev, při kterém na konci vedení dosahuje napětí vyšších hodnot, než na začátku vedení. Objevuje se u nezatížených dlouhých vedeních tzv. naprázdno či s velmi malým zatížením u vedení vvn a zvn. Ryze kapacitní proud procházející vedením vytváří na činném odporu a indukční reaktanci úbytky napětí. Díky těmto úbytkům vzniká vyšší napětí na konci vedení, než jaké je na začátku.

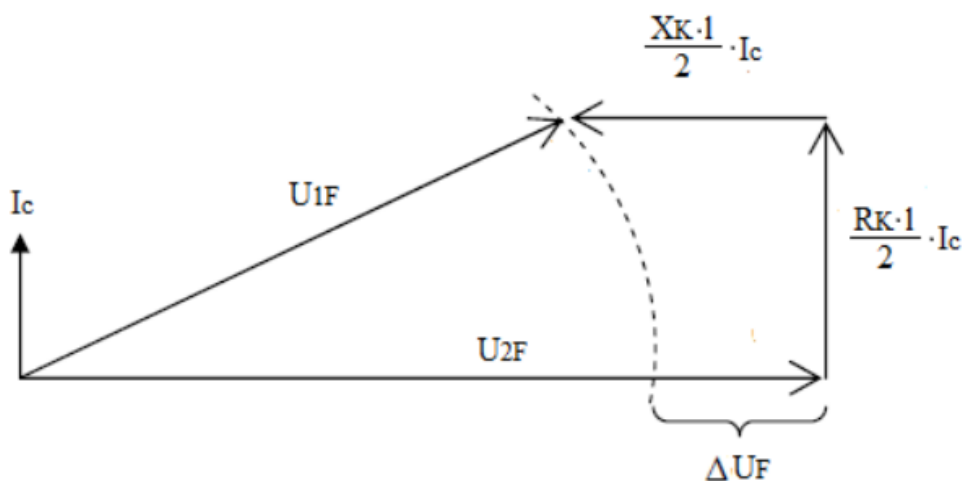


Obrázek 1.9: T-článek [13]

Jelikož se jedná o chod naprázdno, na konci vedení není žádný odběr, tudíž se výstupní proud rovná nule. Díky této skutečnosti můžeme zanedbat pravou část podélné impedance, kde se rovněž úbytek napětí rovná nule. Výstupní napětí je pak rovno napětí na příčné admitanci. Kapacitní proud je roven vstupnímu napětí. Vynecháme-li pravou stranu můžeme zjednodušit schéma na obrázek 1.10. [13]



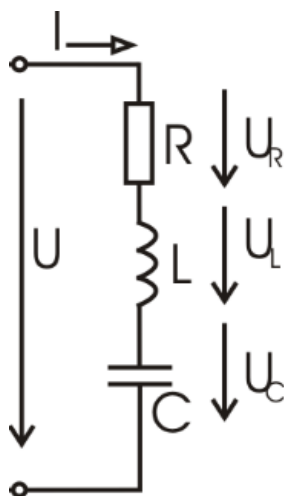
Obrázek 1.10: Zjednodušený T-článek [13]



Obrázek 1.11: Fázový diagram chodu naprázdno [13]

4.2 Ferorezonance

Jedná se o jev provázející všechny napěťové úrovně elektrizační sítě. Vyvází se v obvodech obsahující indukčnosti, kapacity a odpory. Předpokládáme-li obvodové parametry R , L a C konstantní je rezonanční kmitočet daný vztahem $\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}}$.



Obrázek 1.12: Sériový RLC obvod [13]

Se změnou frekvence nastává plynule rezonanční stav, přičemž podle zapojení obvodových parametrů rozdělujeme rezonance na paralelní nebo sériové. V případě sériové rezonance protéká obvodem maximální proud omezený pouze rezistencí R , a to za předpokladu napájení obvodu harmonickým napětím, přičemž impedance je při rezonanční frekvenci nejmenší. Reaktance X_C a X_L jsou v protifázi a určují velikost úbytku napětí na kapacitě a indukčnosti. Při rezonanci bývají tyto dvě reaktance mnohonásobně vyšší než R , proto na indukčnosti a kapacitě se vytvoří mnohonásobně vyšší napětí, než jaké má zdroj. Při zvyšování frekvence zdroje se bude zvyšovat plynule napětí na indukčnosti, přičemž jeho maximum bude při rezonančním kmitočtu. Pokud bychom zvyšovali i nadále napětí bude indukčnost klesat. Vykreslením kmitočtové závislosti indukčnosti na amplitudě napětí vidíme spojitý průběh, který má jedno maximum rovnající se právě rezonančnímu kmitočtu. Stejný průběh vykazuje kmitočtová závislost amplitudy magnetického toku lineární indukčnosti. Tento magnetický tok je daný integrací napětí na indukčnosti. Průběh magnetického toku pro frekvenci ω je posunutý o $\frac{\pi}{2}$ od napětí a amplituda magnetického toku je ω – krát nižší než amplituda napětí. U reálných zdrojů indukčnosti, jako jsou vinutí s feromagnetickými jádry, obsahují mnoho rezonančních obvodů, jelikož nemají konstantní indukčnost, která závisí na velikosti procházejícího proudu vinutím. U feromagnetických materiálů je tedy závislost magnetické indukce na intenzitě magnetického pole nelineární a nejednoznačná. Rezananční jevy vznikající v takovémto obvodu jsou odlišné od rezonančních jevů vznikajících v obvodech, které mají konstantní indukčnost. Díky tomu vzniká jev, který je nazván ferorezonance.

[13]

4.3 Samobuzení

Pokud generátor není schopný kompenzovat kapacitní zátěž nastává samobuzení. I při plně odbuzení generátoru je projevem trvalý nárůst napětí. Pokud je menší kapacitní reaktance připojených vedení X_c , přepočtena na primární stranu blokového transformátoru vodní elektrárny X_{cp} , než součet rozptylové reaktance X_s přepočtené taktéž na primární stranu X_{sp} a synchronní podélné reaktance generátoru X_d , vzniká v této situaci riziko samobuzení.

$$X_{cp} < X_d + X_{sp} \quad (4.1)$$

V případě samobuzení dochází k nasycení jádra a vzniká v generátoru kritické přehřátí způsobeno rychlým zvýšením ztrát v železe.

[14]

5 Tvorba výpočetního modelu obnovovacích tras

5.1 MODES

Obě trasy vytvořila v programu MODES společnost ČEPS. Nasimulován byl rozběh vlastní spotřeby tepelné elektrárny Chvaletic z bloku vodní elektrárny Orlik a bloku přečerpávací vodní elektrárny Dlouhé Stráně. Modelování jednotlivých komponentů je popsáno v následujícím textu.

5.1.1 Generátor

Generátor je nahrazen rázovou reaktancí X_d'' a fázorem elektromotorické síly E'' . Pro zjednodušení se předpokládá vztah $X_q'' = X_d''$ se zanedbáním odporu statoru. Můžeme také uvažovat jeho náhradní reaktanci X_τ a převod p pokud generátor pracuje společně s blokovým transformátorem. [15]

$$X_\tau = u_k \cdot \frac{S_{Gn}}{S_{\tau n}} \cdot \frac{U_{\tau n}^2}{U_{Gn}} \quad (5.1)$$

$$p = p_\tau \cdot \frac{S_v}{S_{Gn}} \quad (5.2)$$

5.1.2 Rovnice synchronního stroje

Následující body obsahují předpoklady z nichž odvodíme přes upravené Parkovy rovnice výpočet elektromechanických přechodných dějů:

- platí pro malé odchylky otáček od synchronních
- jsou zanedbány transformační napětí (derivace statorových proudů podle času)
- reaktance nejsou funkcí proudu (zanedbání sycení)
- uvažuje se pouze 1. harmonická elektromotorické síly statoru
- rozložené vinutí rotoru se zjednodušeně uvažuje jako koncentrické
- tlumící vinutí (nebo účinek masivního rotoru) je nahrazeno po jednom ekvivalentním koncentrickým vinutím v podélné a dvou ekvivalentních koncentrických vinutích v příčné ose
- tlumící vinutí jsou magneticky symetrická ($X_q'' = X_d''$)
- odpory statoru a kapacity mezi vinutími jsou zanedbány
- ztráty naprázdno a ztráty Jouleovy jsou hrazeny z mechanického výkonu

Pokud do osy d a q uděláme průměty elektromotorických sil E_q' , E_d' , E_q'' , E_d'' pak platí v poměrných hodnotách. [15]

$$T'_{d0} \cdot E_q'^{\circ} = U_B + (X_d - X_d') \cdot I_d - E_q' \quad (5.3)$$

$$T'_{q0} \cdot E_d'^{\circ} = -(X_q - X_q') \cdot I_q - E_d \quad (5.4)$$

$$T_{d0}'' \cdot E_q'' = E_q' + (X_d' - X_d'') \cdot I_d - E_q'' \quad (5.5)$$

$$T_{q0}'' \cdot E_d'' = E_d' - (X_q' - X_q'') \cdot I_q - E_d'' \quad (5.6)$$

I_d, I_q, U_B - průměty proudu statoru a budící napětí, $T_{d0}', T_{d0}'', T_{q0}''$ - časové konstanty naprázdno, $X_d, X_d', X_d'', X_q, X_q', X_q''$ - synchronní, přechodná a rázová reaktance v podélné ose a příčné ose ($X_q'' = X_d''$)

Poměr budícího proudu i napětí při chodu naprázdno je rovno 1 a elektromotorická síla synchronní reaktance E_q je rovna budícímu proudu I_B a platí

$$E_q = I_B = E_q' - (X_d - X_d') \cdot I_d \quad (5.7)$$

Mechanická pohybová rovnice v obecném tvaru je pak

$$T_M \cdot s_G^\circ = \frac{N_T}{[(1+s_G)k_N]} - \frac{P_G + \Delta P_G}{1+s_U} - M_{AS} \quad (5.8)$$

$$\delta^\circ = \Omega_0 s_G \quad (5.9)$$

5.1.3 Budící systémy

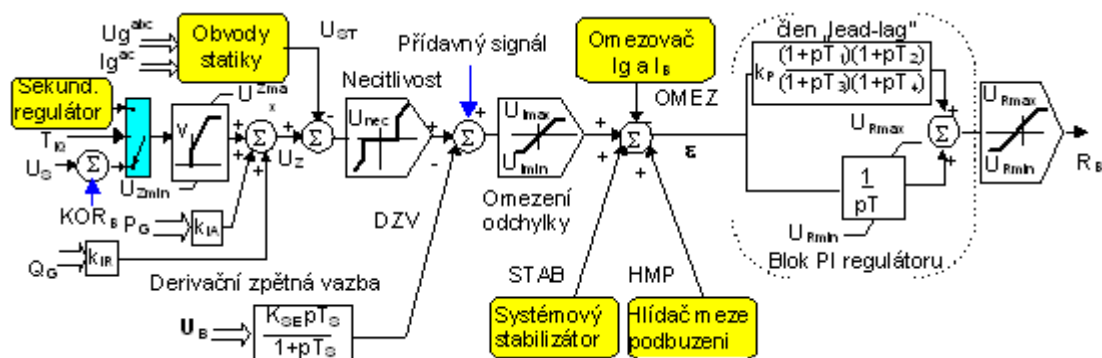
Budící proud je generován stejnosměrným generátorem či střídavým generátorem s usměrňovači. Dynamika budiče se zhoršuje, jelikož se tyto stejnosměrné zdroje zapojují do kaskády. Projevem je zvýšení ekvivalentní časové konstanty, a to má za následek pomalejší odezvu na regulované napětí či změnu hodnoty. Protože se zde objevují problémy s komutací, používají se pro malé generátory.

Budící systém generátoru sestává z regulátoru buzení a budiče. Pro trasu Dlouhé Stráně - Chvaletice byl použit statický nezávislý budič AC_4. Základem těchto budících systémů jsou tyristorové usměrňovače. Ovládání je realizováno regulátorem buzení přes řídicí obvody zapalovacího úhlu tyristoru. Napájení přes transformátor lze realizovat více způsoby, a to přímo z generátoru nebo z nezávislého zdroje. Největší nevýhodou statických systémů je nutnost napájení rotorového vinutí přes kroužky. Naopak výhodou je velká reakční rychlost změny napětí regulátoru.

Hlavní funkce regulátoru buzení je udržet zadané napětí na svorkách generátoru. Mimo to má i doplňkové funkce jako je ochrana generátoru před přetížením pomocí omezení statorového a rotorového proudu, ochrana statické stability při podbuzení, tlumí elektromechanické kývání a přechodné děje a udržuje jalový výkon na požadované hodnotě.

Pro generátor Orlíku byl použit rotační stejnosměrný budič DC_1.

[15]



Obrázek 1.13: Schéma regulátoru buzení

5.1.4 Transformátor a vedení

Transformátory a vedení se modelují jako π - články. U transformátoru jde v principu o uplatnění převodu napětí do větve s ohledem na činný odpor, kapacitní susceptanci a indukčnost. V případě vedení jsou to stejné parametry ale bez převodu napětí. Šítkové hodnoty transformátoru se přepočtou do vstupních hodnot podle následujících rovnic. [15]

$$Z_{Tn} = \frac{T_{Tn}^2}{S_{Tn}} \quad (5.10)$$

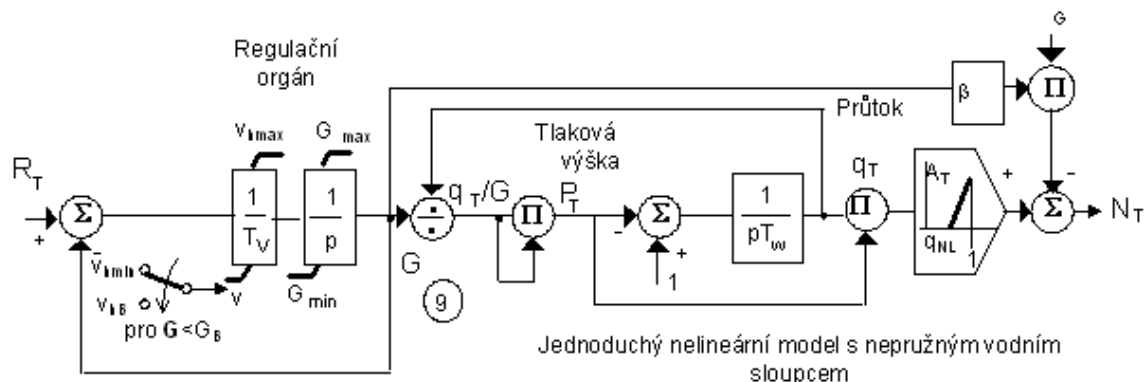
$$R_T = \frac{P_{Kn}}{S_{Tn}} \cdot Z_{Tn} \quad (5.11)$$

$$X_T = \sqrt{u_k \cdot p_{KON}^2 \cdot Z_{Tn}^2 - R_T^2} \quad (5.12)$$

5.1.5 Turbína

Teoretický výkon turbíny N_T je dán součinem spádu H , průtoku Q , měrné hmotnosti ρ a zrychlení g . Pokud zmenšíme tento teoretický výkon o třecí ztráty v přivaděči, ztráty obtokem kolem oběžného kola a ucpávkami, ztráty vířením a zakřivením vodního proudu, ztráty rázem a mechanické ztráty třecí a ventilační dostaneme skutečný výkon.

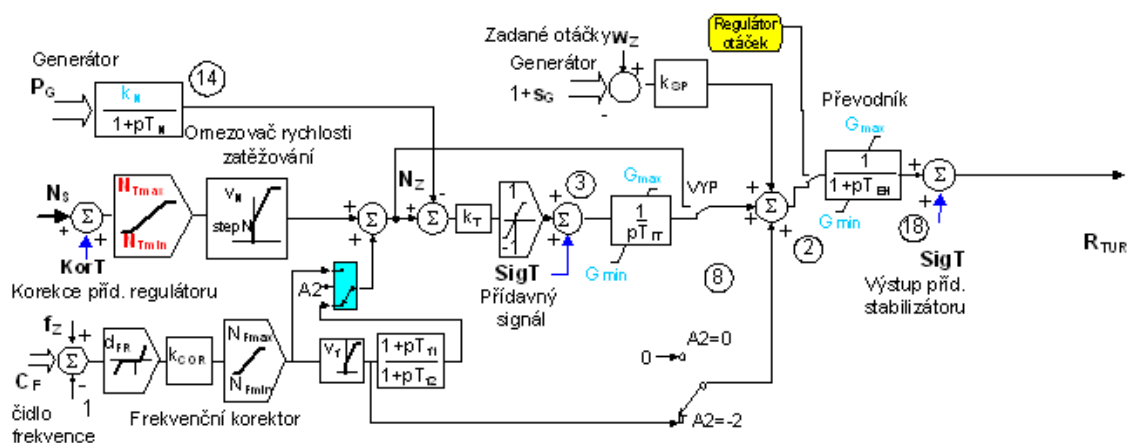
Model turbíny je na obrázku 1.14. Lze ho použít pro přetlakové neboli reakční turbíny, což jsou Kaplanova i Francisova a byl vytvořen na základě doporučení IEEE. Při malém zatížení je respektována snížená rychlost zavírání regulačního orgánu a u otevření jsou respektovány dynamické rázy. [15]



Obrázek 1.14: Schéma turbíny

5.1.6 Regulátor turbíny

Regulátor pracuje v základním režimu regulace. U reverzačních vodních turbín s funkcí čerpadla se používá regulace otevření. Při spuštění bloku či odchýlení frekvence se uplatňuje regulace otáček. Schéma regulátoru je na obrázku 1.15



Obrázek 1.15: Schéma regulátoru otáček

5.1.7 Zátěž

Modeluje se jako odběr v uzlu. V programu MODES jsou 4 základní typy zátěže,

- Statická zátěž - Používá se v sítích, kde nastávají pouze malé změny napětí a frekvence.
- Dynamická zátěž - Reaguje na změny napětí a frekvence v celém rozsahu, díky čemuž jsou odběry dynamicky závislé.
- Termostatická zátěž - Obsahuje časově proměnné části zátěže měnící se s oteplením. Uplatňuje se pouze při odběru s činným charakterem.

- Ekvivalentní asynchronní motor - Jedná se o stacionární model motoru, bez elektromagnetického přechodného děje na statoru a rotoru.

Skluz, pohybová rovnice a mechanický výkon zátěže pro ekvivalentní asynchronní motor.

$$s = \frac{s_R + s_U}{1 + s_U} \quad (5.13)$$

$$T_{MECH} \cdot s_R = M_{MECH} - \frac{P_{EL}}{1 + s_U} \quad (5.14)$$

$$M_{MECH} = k_{ZAT} \cdot \cos \varphi_n \cdot k_A \cdot [1 - A_N - B_M + A_M \cdot (1 - s_R) + B_M \cdot (1 - s_R)^2] \quad (5.15)$$

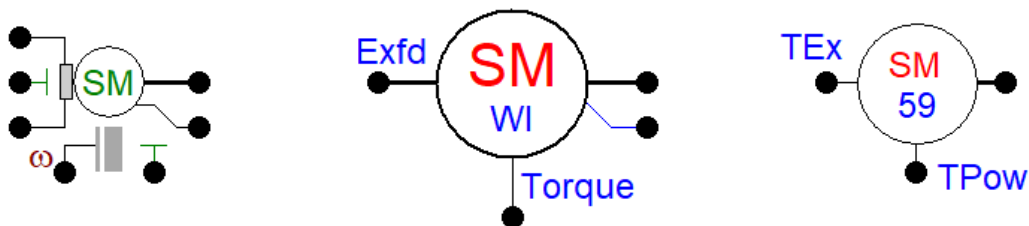
[15]

5.2 ATP - EMTP

Trasa v programu ATP-EMTP byla vytvořena pro sledování elektromagnetických přechodných dějů.

5.2.1 Synchronní generátor

K modelování synchronního generátoru lze použít 3 modely, těmi jsou UM1 Synchronous, Synchronous WI a SM59. Poslední zmíněný SM59 má téměř totožné parametry, které se zadávají do programu MODES, proto byl použit u obou tras. Generátor SM59 má konstantní moment a buzení. Lze na něj připojit 5 výstupů TACS pro měření veličin a řídicích signálů TACS, také je možné k tomuto zdroji připojit budič, a to k přípojnému bodu označenému TEx a turbínu k přípojnému bodu označenému TPow. Zadané parametry byly převzaty z programu MODES a nacházejí se v tabulce 1.5. Druhý zmíněný Synchronous WI nabízí v základu již modely buzení a řízení rychlosti. První zmíněný UM1 Synchronous má možnost odděleného zadávání hodnot odporu, příčné a podélné indukčnosti a indukčnosti respektující magnetický obvod.

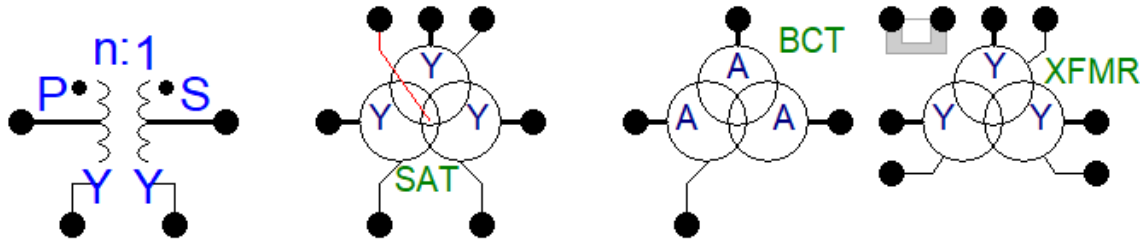


Obrázek 1.16: Modely synchronních generátorů

5.2.2 Transformátor

Máme na výběr 4 modely. První je model Ideal představující ideální bezztrátový transformátor, který je charakterizován pouze převodem. U toho modelu nelze měnit typ spojení vinutí. Dalším typem je Saturable transformátor. Hlavní výhodou toho modelu je, jak už z jeho názvu vyplývá, možnost nastavení saturace. Mimo jiné se zadávají parametry odporu a indukčnosti

pro primární i sekundární vinutí a případně i pro terciální vinutí. Třetí možností je model BCTRAN. Zadáním štítkových hodnot tento model vygeneruje poměrně přesný model transformátoru. Poslední model je pojmenován HYBRID. Jedná se o nejpropracovanější model transformátoru s topologicky korektní implementací jádra. Pro náš účel bych zvolen BCTRAN.



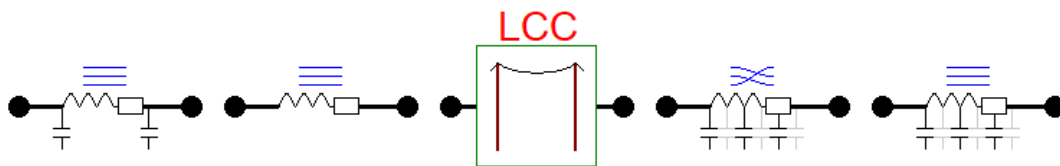
Obrázek 1.17: Modely transformátorů

5.2.3 Vedení

Lze ho modelovat několika způsoby. Mezi základní rozdělení jsou modely s rozloženými parametry, soustředěnými parametry a pomocí procedury LCC. U poslední zmíněné procedury LCC se dá vybrat mezi články Bergeron, π , JMarti, Semlyen, Noda. Tento model vypočítá ze zadaných rozměrů stožárů, odporu země, frekvence a délky vedení parametry RLC. U modelu s rozloženými parametry je možné vedení modelovat jako transponované (Clark), nebo netransponované (KCLee). Jelikož do programu MODES se zadávají hodnoty R, X, B zvolil jsem proto transponovaný model s rozloženými parametry a hodnoty jsou přepočítané pomocí následujících rovnic.

$$L = \frac{X}{\omega} = \frac{X}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad (5.16)$$

$$C = \frac{B}{\omega} = \frac{B}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad (5.17)$$



Obrázek 1.18: Modely vedení

5.2.4 Zátěž

Zátěž je možné modelovat z lineárních či nelineárních RLC prvků nebo jako točivý stroj. V našem případě jsme využili tři rezistory spojené do hvězdy s uzemněným uzlem, přepočtené na napěťovou hladinu.

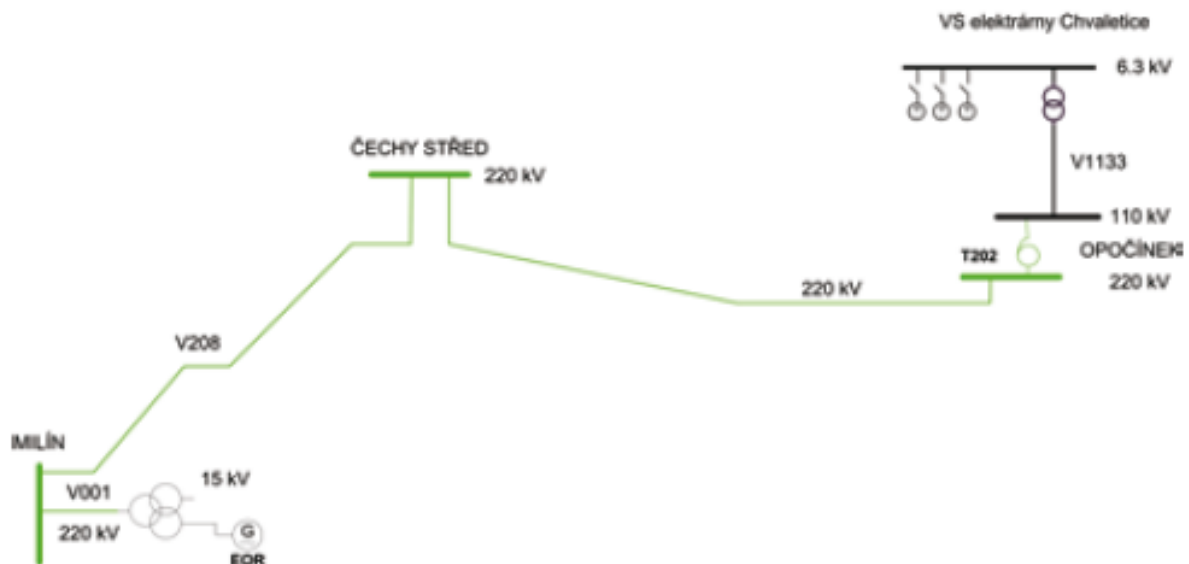
$$R = \frac{\left(\frac{U}{\sqrt{3}}\right)^2}{\frac{P}{3}} = \frac{\left(\frac{6300}{\sqrt{3}}\right)^2}{\frac{15 \cdot 10^6}{3}} 2.646 \Omega \quad (5.18)$$

6 Analýza napěťových poměrů na obou obnovovacích trasách a jejich porovnání

6.1 Model obnovovací trasy VE Orlík - T Chvaletice

Obnovovací trasa je vyobrazena na obrázku 1.19. Trasa začíná vodní elektrárnou Orlík, kde se napětí transformuje z 15 kV na 220 kV, pokračuje rozvodnou Milín a dále Čechy Střed. Ve stanici Opočíněk se transformuje z 220 kV na 110 kV a v tepelné elektrárně Chvaletice na 6,3 kV, kde trasa končí a je napájena vlastní spotřebou. Vodní elektrárna Orlík certifikace pro start ze tmy již má, a proto by tuto trasu neměly doprovázet žádné zásadní přechodové jevy ovlivňující najetí pohonů vlastní spotřeby TE Chvaletice.

Trasa byla nasimulována v programu MODES pro sledování elektromechanických jevů a v programu ATP-EMTP pro sledování elektromagnetických jevů.



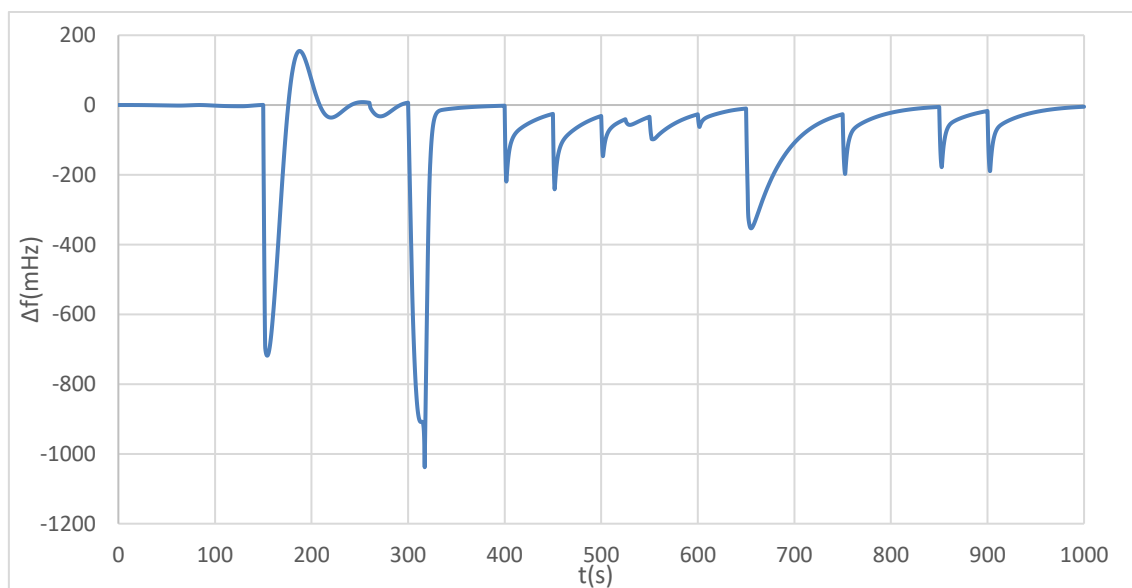
Obrázek 1.19: Obnovací trasa VE Orlík - TE Chvaletice

6.1.1 MODES

Simulační výpočty elektromechanických přechodných dějů v programu MODES, spočívaly jednak v nabuzení trasy a následně ve spuštění jednotlivých pohonů vlastní spotřeby. Tyto pohony vlastní spotřeby byly postupně připojovány, a to v časech uvedených v tabulce 1.4. Při skutečném rozběhu jsou tyto časové odstupy delší. Tabulka také obsahuje označení pohonu, název a jmenovitý zdánlivý výkon.

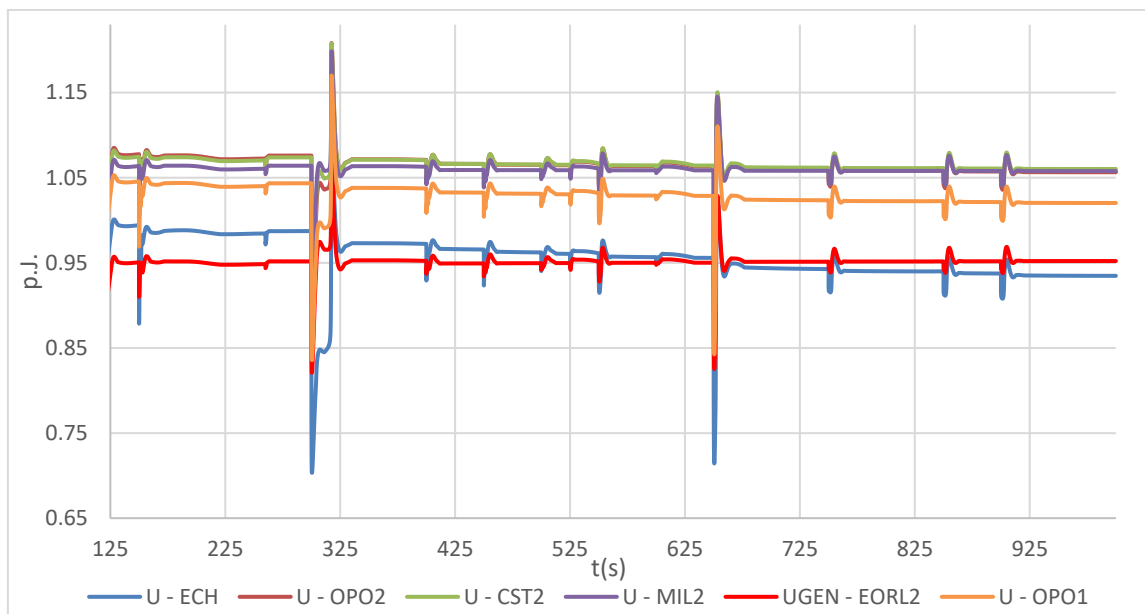
Tabulka 1.4: *Scénář rozběhu pohonů VS ECHV*

Čas [s]	označení	pohon	Výkon [MVA]
140	VC_12	Čerpadla vodoproudých vývěv	2x0.312
150	CHL	Chladička	2.53
300	KV	Kouřový ventilátor - rozběh se zavřenými lopatkami a pak otevření	4.957
400	VV_1	Vzduchový ventilátor	1.204
450	VV_2	Vzduchový ventilátor	1.204
500	KC1_1	Kondezátní čerpadlo prvního stupně	0.312
550	KC2_2	Kondezátní čerpadlo druhého stupně	0.94
650	EN_1	Napáječka	4.88
750	M1_1	První mlýnský okruh	0.787
850	M1_2	Druhý mlýnský okruh	0.787
900	M1_3	Třetí mlýnský okruh	0.787



Obrázek 1.20: *Průběh frekvence generátoru VE Orlik*

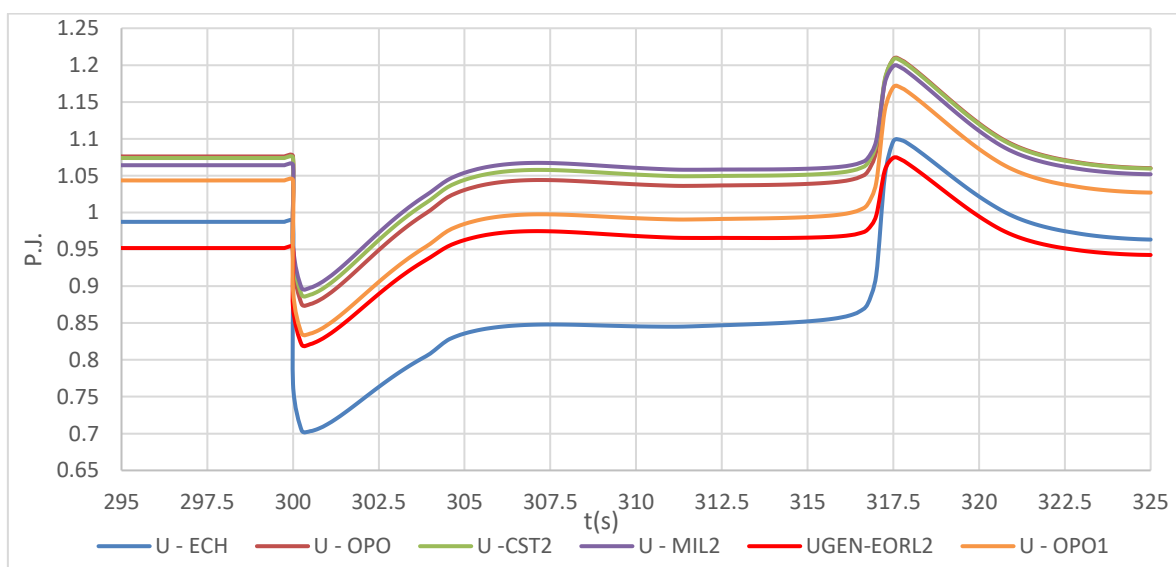
Obrázek 1.20 znázorňuje průběh frekvence měřenou na generátoru VE Orlik. Největší pokles je zaznamenán u kouřového ventilátoru s poklesem o 1038,4 mHz od základní frekvence 50 Hz. Průběh frekvence splňuje požadavky, které jsou později rozebrány, pro úspěšný rozběh všech pohonů vlastní spotřeby TE Chvaletic.



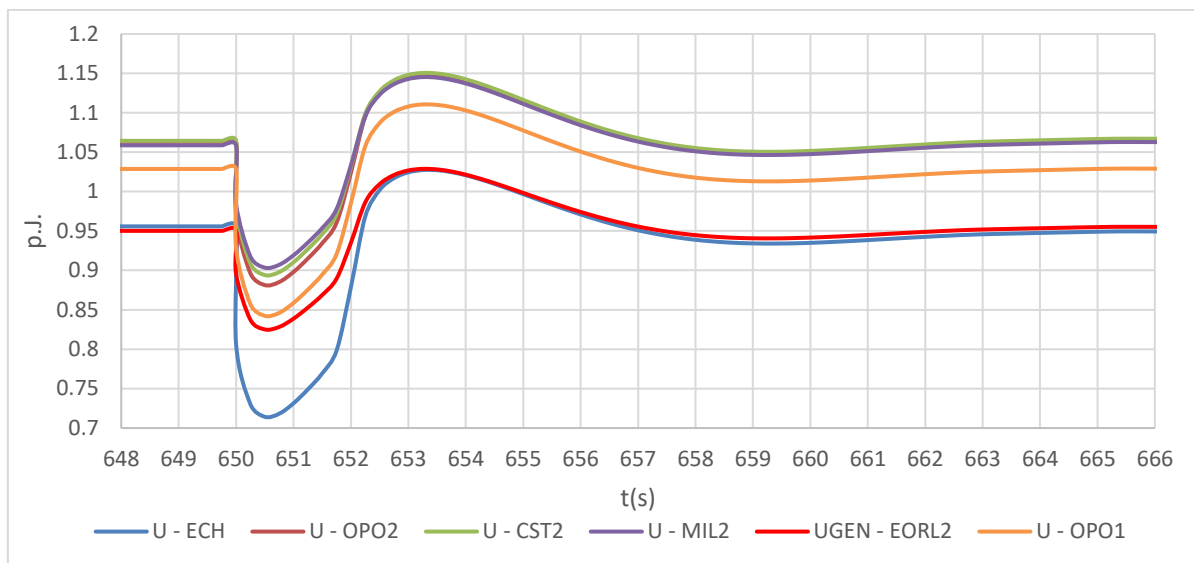
Obrázek 1.21: *Průběh napětí při sestavování trasy VS ECH*

Na obrázku 1.21 jsou vyobrazeny průběhy napětí na jednotlivých prvcích trasy. Při připojování jednotlivých pohonů v TE Chvaletice je vidět na průběhu postupný pokles napětí. Během simulace jsou všechny napěťové průběhy v mezích pro úspěšný rozběh.

Následující grafy ukazují detailní průběhy napětí při zapnutí dvou největších pohonů vlastní spotřeby TE Chvaletic měřené podél najíždějící trasy. Rozběh kouřového ventilátoru trvá mnohem déle, než je tomu u napáječky, což je způsobeno větší setrvačností pohonu.



Obrázek 1.22: *Rozběh kouřového ventilátoru - zavřené lopatky a pak otevření*



Obrázek 1.23: Rozběh napáječky

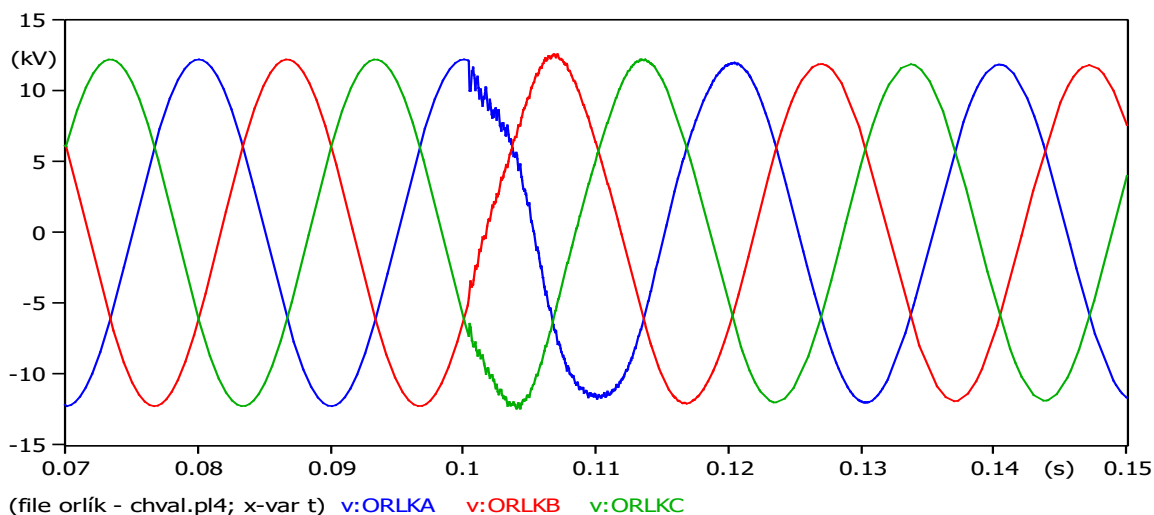
Kritéria pro úspěšný rozběh:

- Prvním kritériem pro úspěšný rozběh jsou meze $-1,5$ a $+0,5$ Hz od frekvence 50 Hz. Tato kritéria jsou určena pásmem normálního provozu vodní elektrárny. Z průběhu frekvence generátoru VE Orlík na obrázku 1.21 vidíme, že kladná odchylka není větší než 0,2 Hz a záporná odchylka není větší než 1,1 Hz. Z toho vyplývá, že je tato frekvence v mezích pásma.
- Nesepnutí podpěťové ochrany, která na hladině 6,3 kV při 1. stupni nesmí klesnout pod 80% U_n po dobu delší než 6 sekund a při druhém stupni nesmí klesnout pod 65% U_n po dobu delší než 2 sekundy. Zapnutí kouřového ventilátoru ve 300. sekundě způsobí pokles napětí VS Chvaletic pod 80%, ovšem tento pokles trvá necelé 4 sekundy a tudíž podpěťová ochrana nezareaguje jak je patrné z obrázku 1.22. V 650. sekundě při zapnutí napáječky dochází znova k poklesu napětí pod 80%, zde opět po dobu kratší než 2 sekundy, což je viditelné z obrázku 1.23 a ochrana opět nezareaguje.
- Dalším kritériem je nepůsobení přepětí ochrany VE Orlík na napěťové hladině 15 kV. Napětí nesmí přesáhnout při 1. stupni 112 % U_n po dobu delší než 10 sekund a při 2. stupni pak nesmí vůbec přesáhnout 130% U_n . V grafech 1.21, 1.22 a 1.23 je průběh svorkového napětí VE Orlík značen červeně. Toto napětí nepřesáhne 112 % U_n a to ani v případě kouřového ventilátoru či napáječky. [16]

Ze simulace v programu MODES vyplývá, že využití hydrogenerátoru VE Orlík pro rozběh pohonů vlastní spotřeby TE Chvaletice je možné a k samobuzení generátoru zde nedochází.

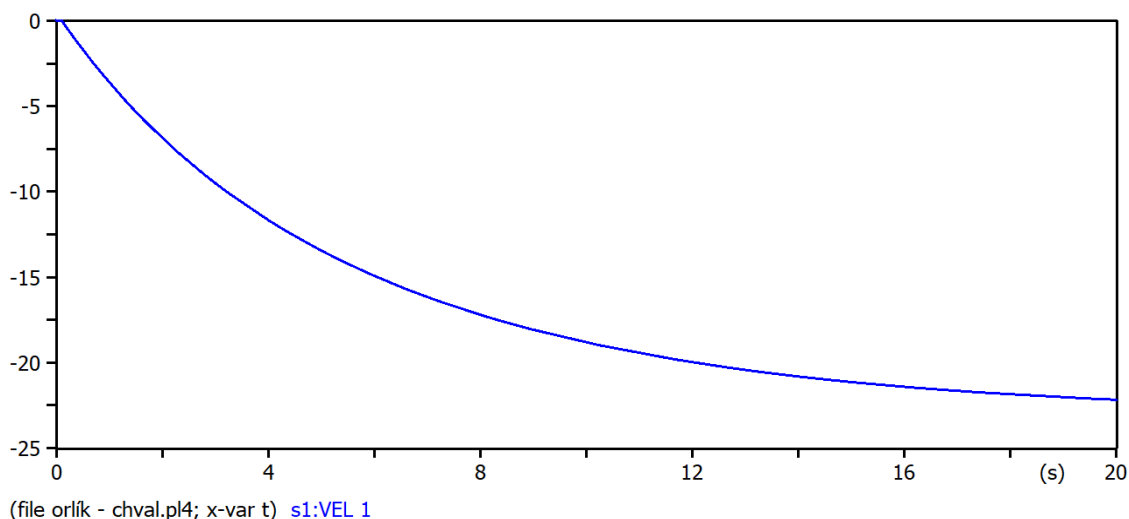
6.1.2 APT - EMTP

Simulace začíná již s rozběhlým synchronním generátorem, trasa až po rozvodnu Opočíněk je pod napětím a nachází se v nezátíženém stavu - stav naprázdno. V čase 0,1 s dojde k sepnutí vypínače v rozvodně Opočíněk, což vede k připojení vedení V1133 o napětíové hladině 110kV a zátěže reprezentující největší pohon, kterým je kouřový ventilátor Chvaletic.



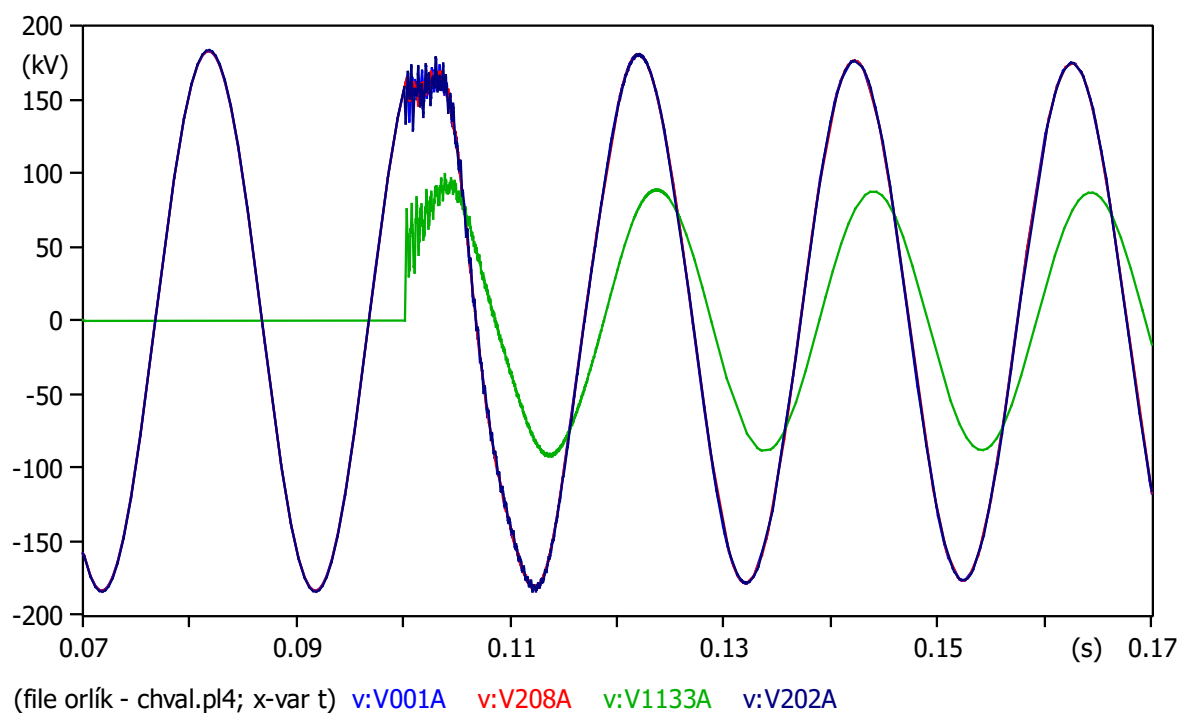
Obrázek 1.24: 3fázový průběh fázového napětí na VE Orlík

Jak můžeme vidět na obrázku 1.24 tak na generátor VE Orlík nemá sepnutí zátěže zásadní vliv. Na první fázi se objeví krátký přechodový děj trvající 5 ms.



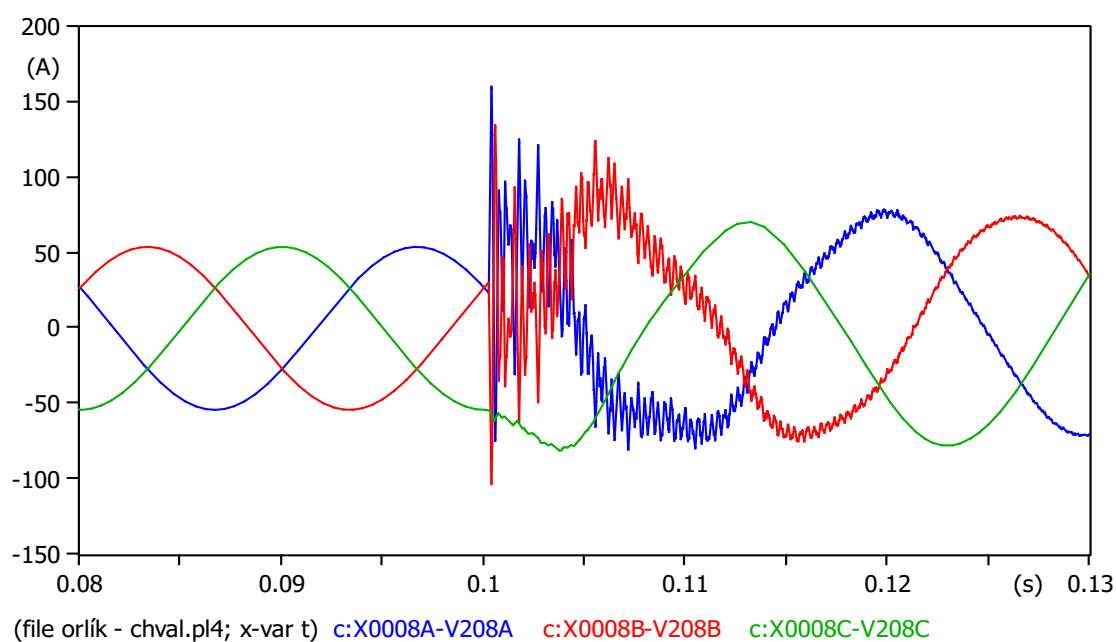
Obrázek 1.25: Odchylka úhlové rychlosti generátoru VE Orlík

Připínaný kouřový ventilátor v TE Chvaletice je modelována jako činná zátěž, dojde tudíž k poklesu frekvence na generátoru PVE Dlouhé Stráně, a to na hodnotu -22 rad/s jak je patrné z obrázku 1.25. To odpovídá poklesu na hodnotu 46,5 Hz od hodnoty 50 Hz. Jelikož synchronní generátor nemá budicí systém s regulací frekvence, hodnota se nevrátí na původní hodnotu 50 Hz.



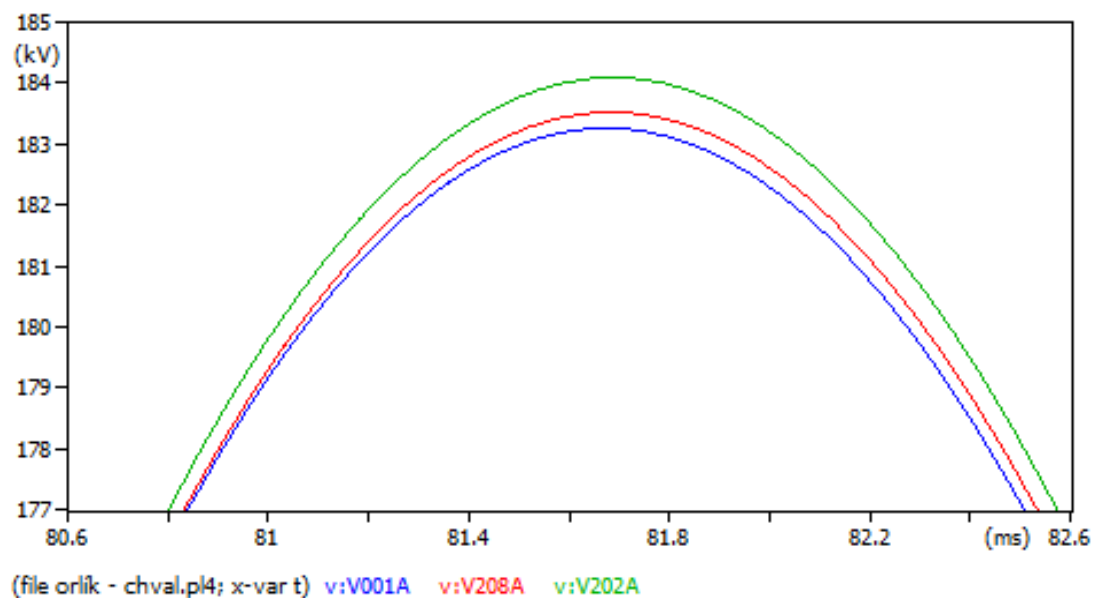
Obrázek 1.26: Průběhy fázového napětí 1 fáze na vedeních

Na obrázku 1.26 je zobrazen průběh napětí na vedeních 220 kV a 110 kV pro první fázi. Na ostatních dvou fázích jsou průběhy skoro totožné s rozdílem pootočených sinusových průběhů. Konkrétně se jedná o vedení V001, V208, V202 a V1133. Na průběhu všech třech fázích u připojovaném vedení V1133 v čase 0,1s je vidět počáteční oscilace napětí, která odezní do doby 200 ms. V tomto čase dojde také k oscilacím na vedeních V001, V208 a V202, která je nejvýraznější u první fáze. Průběh vykazuje na začátku i po odeznění přechodového jevu nedeformovaný sinusový tvar.



Obrázek 1.27: Průběh proudu v rozvodně Čechy Střed

Na první a druhé fázi proudu ve všech rozvodnách se objeví vliv zapínacího proudu. Ten je způsobován saturací magnetického jádra transformátorů a odezní přibližně do 30 ms. Tento jev je zachycen na obrázku 1.27. Na průběhu proudu v TE Chvaletice je vliv zapínacího proudu menší, jelikož je zátěž modelována jen jako činný odpor.



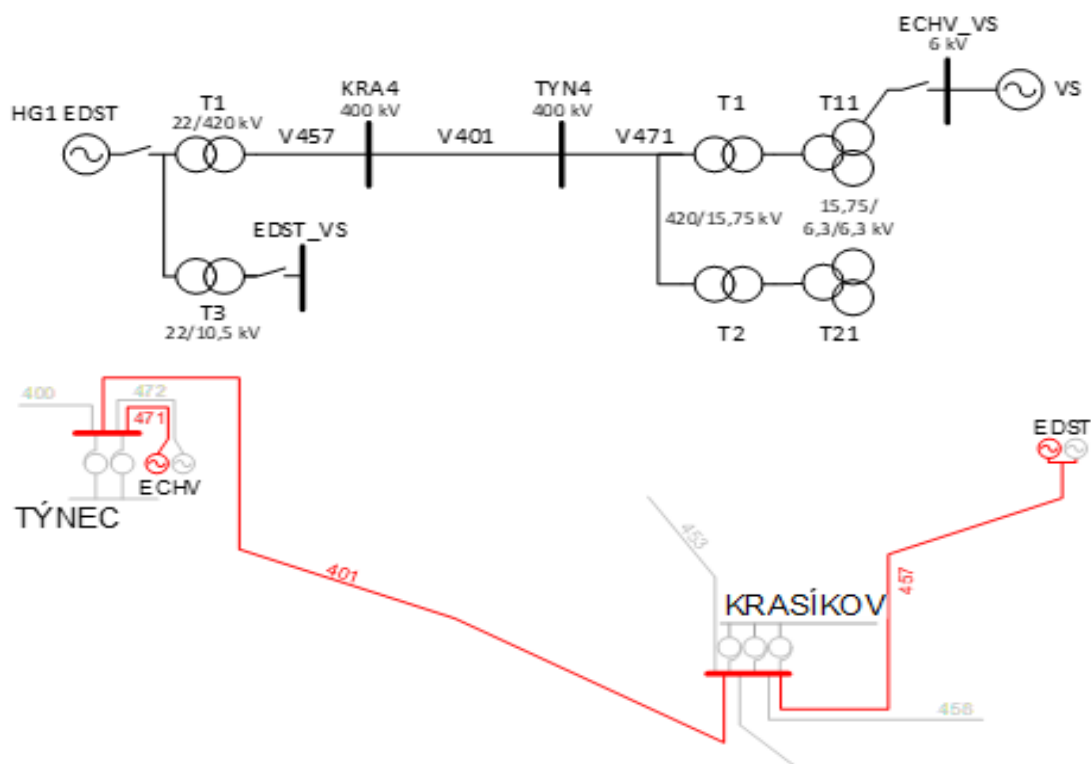
Obrázek 1.28: Ferrantiho jev na vedeních 220 kV

Z detailu průběhů napětí první fáze nezatížených vedeních 220kV je patrný Ferrantiho jev. Na obrázku 1.28 je vidět na nejvzdálenějším vedení V202 od generátoru nejvyšší napětí.

Ačkoliv k přechodným elektromagnetickým dějům viditelných na průbězích z programu ATP-EMTP v tomto případě dochází, neovlivní najížděcí trasu zásadním způsobem. Z toho vyplývá, že tento způsob najetí trasy je možné aplikovat.

6.2 Model obnovovací trasy PVE Dlouhé Stráně - TE Chvaletice

Trasa začíná přečerpávací elektrárnou Dlouhé Stráně, jejíž generátor je připojený k Francisovým turbínám a produkuje napětí 22 kV. Následně se v trafostanici T1 transformuje na hladinu 400 kV a pokračuje po vedení V457 dlouhém 60 km k rozvodně Krasíkov. Dále pokračuje po vedení V401 o délce 103,8 km do rozvodny Týnec. Do tepelné elektrárny Chvaletice vede z rozvodny Týnec vedení V471 dlouhé 8,8 km. V TE Chvaletice se v transformátoru T1 transformuje napětí z 400 kV nejdříve na napětí 15,75 kV a dále přes transformátor T11 na hladinu 6,3 kV, ze které je napájena vlastní spotřeba tepelné elektrárny Chvaletice.



Obrázek 1.29: Obnovovací trasa PVE Dlouhé Stráně - TE Chvaletice

6.2.1 MODES

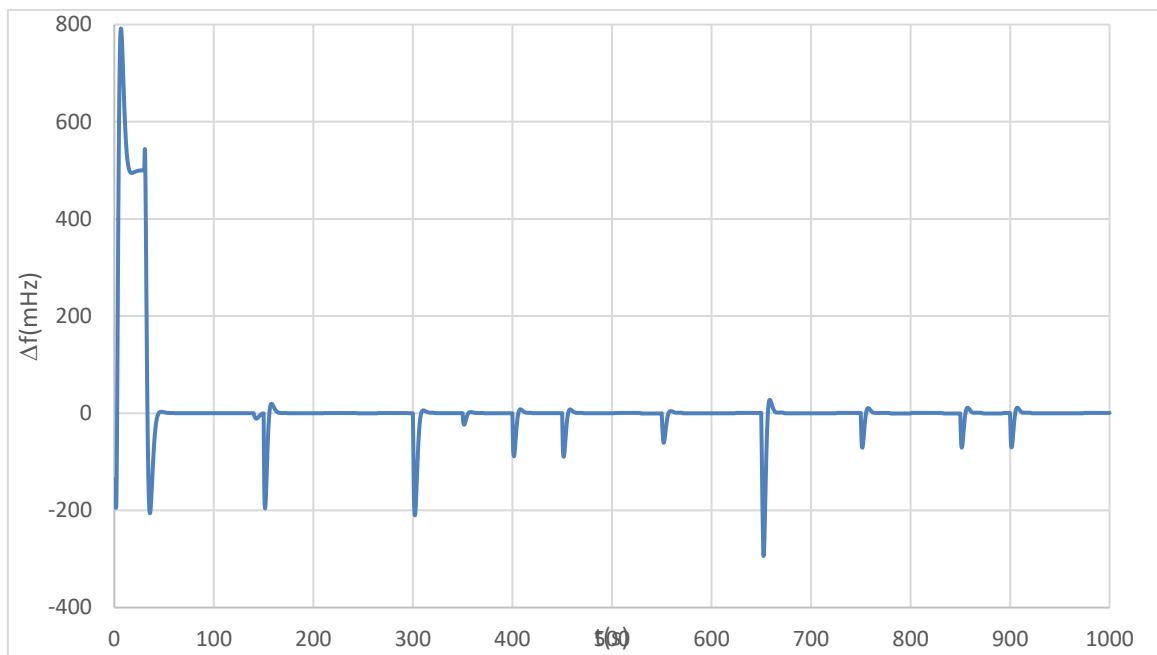
Tak jako v prvním případě i zde byl nasimulován rozběh vlastní spotřeby elektrárny Chvaletice, ale tentokrát z přečerpávací vodní elektrárny Dlouhé Stráně. Simulace je založena na nabuzení trasy a následné spouštění jednotlivých pohonů vlastní spotřeby, které byly postupně připojovány ve stejný čas jako u předchozí trasy VE Orlík - TE Chvaletice, viz. tabulka 1.5. Při skutečném rozběhu by byly rovněž tyto časové odstupy delší. Tabulka také obsahuje označení pohonu, název a jmenovitý zdánlivý výkon.

Tabulka 1.5: *Scénář spínání jednotlivých bloků vlastní spotřeby*

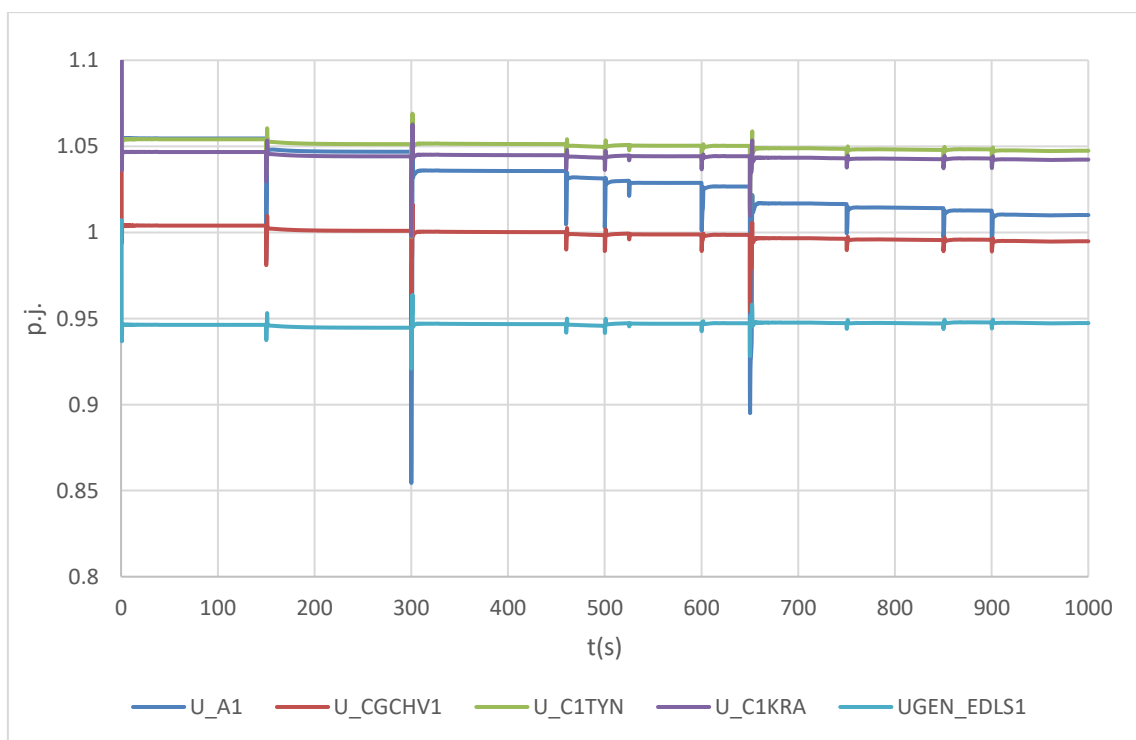
Čas [s]	označení	pohon	Výkon [MVA]
140	VC_12	Čerpadla vodoproudých vývěv	2x0.312
150	CHL	Chladička	2.53
300	KV	Kouřový ventilátor - rozběh se zavřenými lopatkami a pak otevření	4.957
400	VV_1	Vzduchový ventilátor	1.204
450	VV_2	Vzduchový ventilátor	1.204
550	KC1_1	Kondenzátní čerpadlo prvního stupně	0.312
550	KC2_2	Kondenzátní čerpadlo druhého stupně	0.94
650	EN_1	Napáječka	4.88
750	M1_1	První mlýnský okruh	0.787
850	M1_2	Druhý mlýnský okruh	0.787
900	M1_3	Třetí mlýnský okruh	0.787

Obrátek 1.30 zobrazuje průběh frekvence při spouštění jednotlivých pohonů v TE Chvaletice. Jelikož u obou tras jsou časy zapínání jednotlivých pohonů totožné, můžeme porovnat tyto dva průběhy.

Jak můžeme vidět, tak u trasy PVE Dlouhé Stráně - TE Chvaletice mají pohony menší vliv na odchylku frekvence, což může být způsobeno vyšším výkonem generátoru TE Chvaletice. Stejně jako u první trasy i zde je průběh frekvence stabilní a v mezích pro úspěšný rozběh při připojování jednotlivých pohonů vlastní spotřeby TE Chvaletice. Rozdíl je v počáteční velké kladné odchylce frekvence, která je pravděpodobně způsobená přechodem na ostrovní režim.

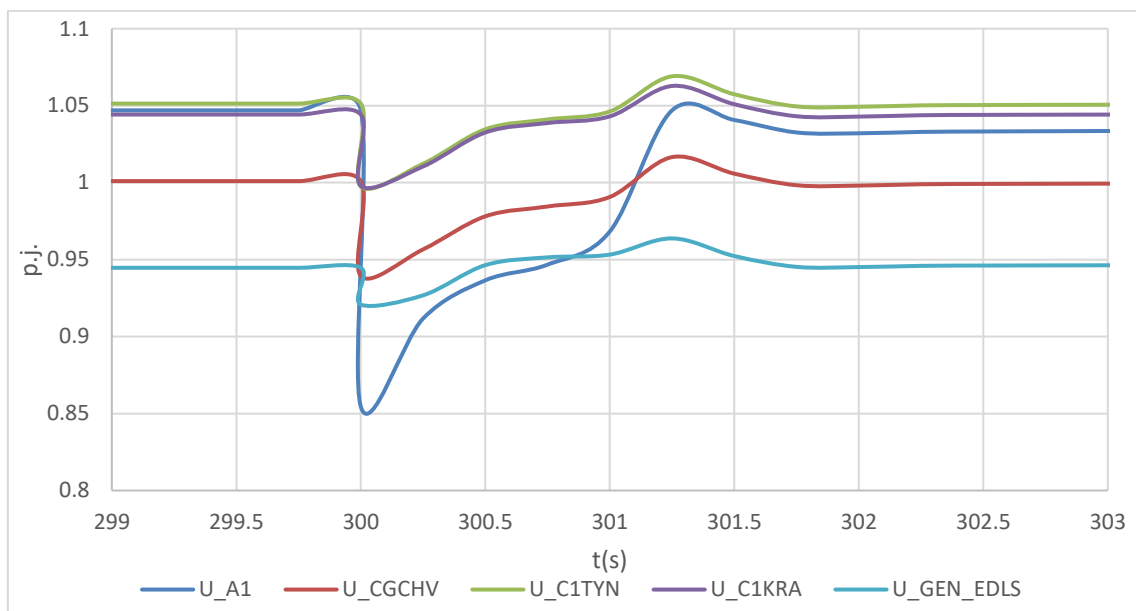


Obrázek 1.30: *Průběh frekvence generátoru PVE Dlouhé Stráně*

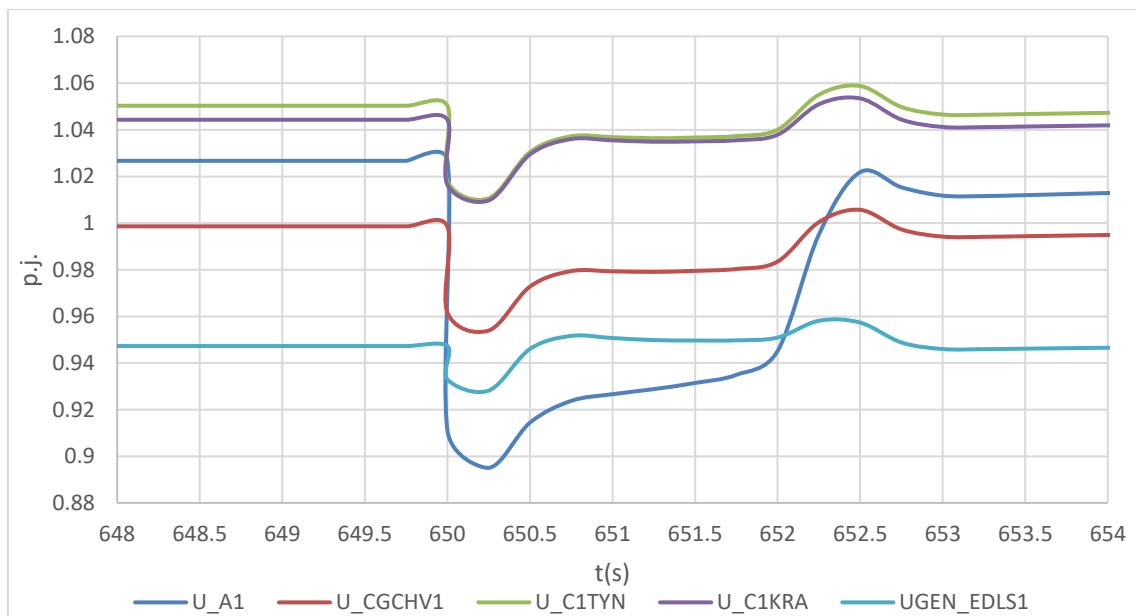


Obrázek 1.31: *Průběh napětí při rozběhu VS ECH*

Z průběhu napětí zobrazeném na obrázku 1.31 je vidět v celé délce stabilní chod. Postupné připojování jednotlivých pohonů vlastní spotřeby TE Chvaletice je patrné na odchylkách napětí. Tyto odchylky jsou v mezích kritérií, které jsou popsány níže. Největší poklesy napětí jsou patrné při rozběhu pohonů s největším výkonem, což jsou kouřový ventilátor a napáječka, které jsou detailněji zobrazeny na následujících grafech.



Obrázek 1.32: *Rozběh kouřového ventilátoru - zavřené lopatky a pak otevření*



Obrázek 1.33: *Rozběh napáječky*

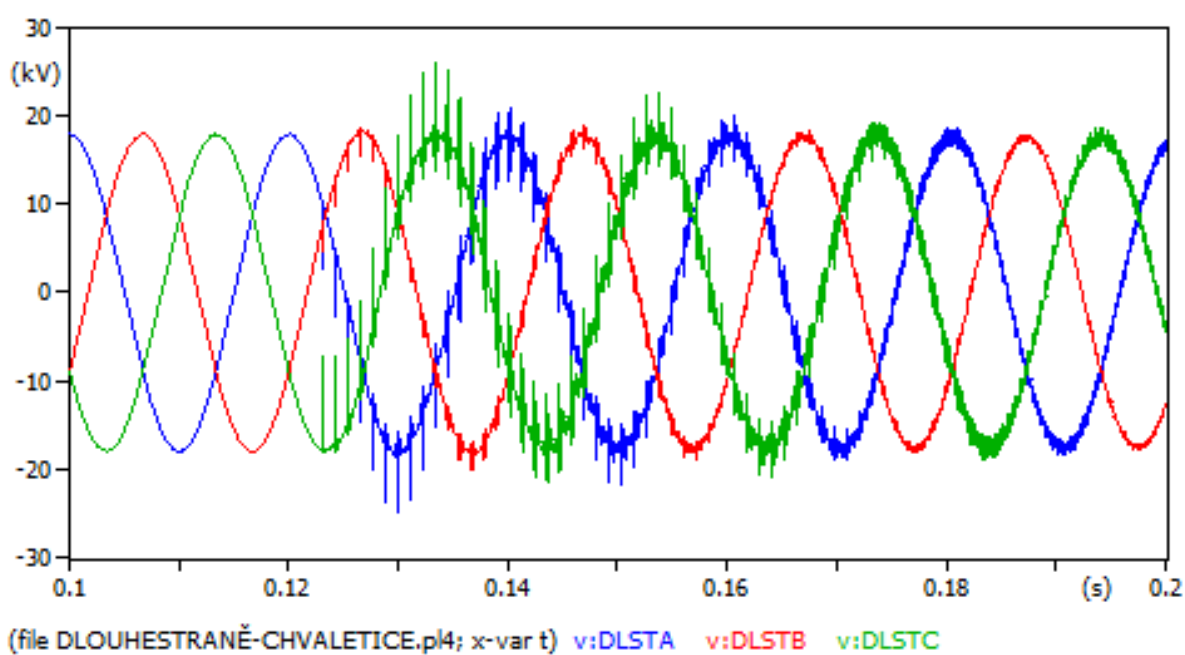
Kritéria pro úspěšný rozběh:

- Z obrázku 1.30 vidíme, že průběh frekvence generátoru PVE Dlouhé Stráně má při připojování jednotlivých pohonů kladnou odchylku menší než 0,5 Hz a zápornou odchylku menší než 1,5 Hz od frekvence 50 Hz. Tyto hodnoty odchylek jsou právě kritériem pro úspěšný rozběh.
- Podpěťová ochrana v rozvodně vlastní spotřeby, na hladině 6,3 kV při 1. stupni nesmí klesnout pod 80% U_n po dobu delší než 6 sekund a při druhém stupni nesmí klesnout pod 65% U_n po dobu delší než 2 sekundy. Toto je dalším kritériem pro úspěšný rozběh. Zapnutí kouřového ventilátoru ve 300. sekundě způsobí pokles napětí VS Chvaletic na hranici 85%, což není dostatečně nízká hodnota pro zareagování podpěťové ochrany. To je ukázáno v detailu na obrázku 1.32. Také v 650. sekundě nedochází k takovému poklesu napětí, aby sepnula podpěťová ochrana, jak je vidět na obrázku 1.33.
- Posledním kritériem je nesepnutí přepěťové ochrany na PVE Dlouhé Stráně. Při 1. stupni nesmí napětí generátoru přesáhnout 112 % U_n po dobu delší než 10 sekund a při 2. stupni pak nesmí vůbec přesáhnout 130% U_n . Toto kritérium je splněno, jak je možné vidět z průběhu napětí na obrázku 1.31. [16]

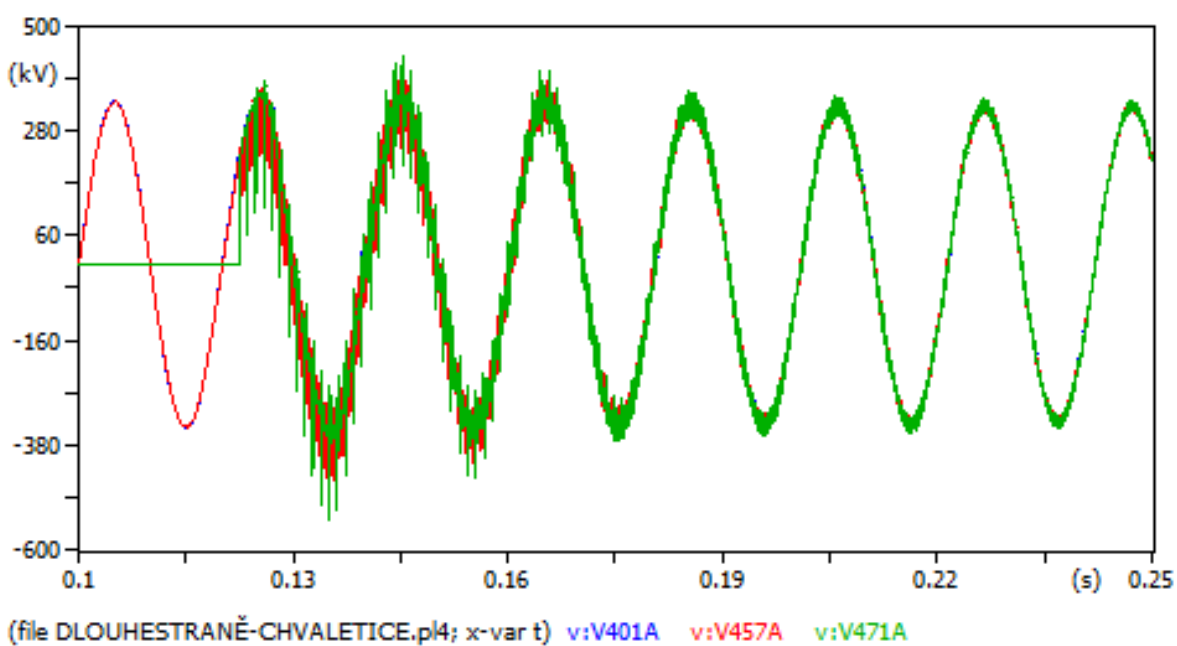
Všechna kritéria jsou splněna, tudíž podle simulací v programu MODES je možné využít hydrogenerátor VPE Dlouhé Stráně pro rozběh pohonů vlastní spotřeby TE Chvaletice ze tmy podle simulovaného scénáře. Stejně jako u první trasy, ani u této trasy podle simulace nedochází k samobuzení.

6.2.2 ATP - EMTP

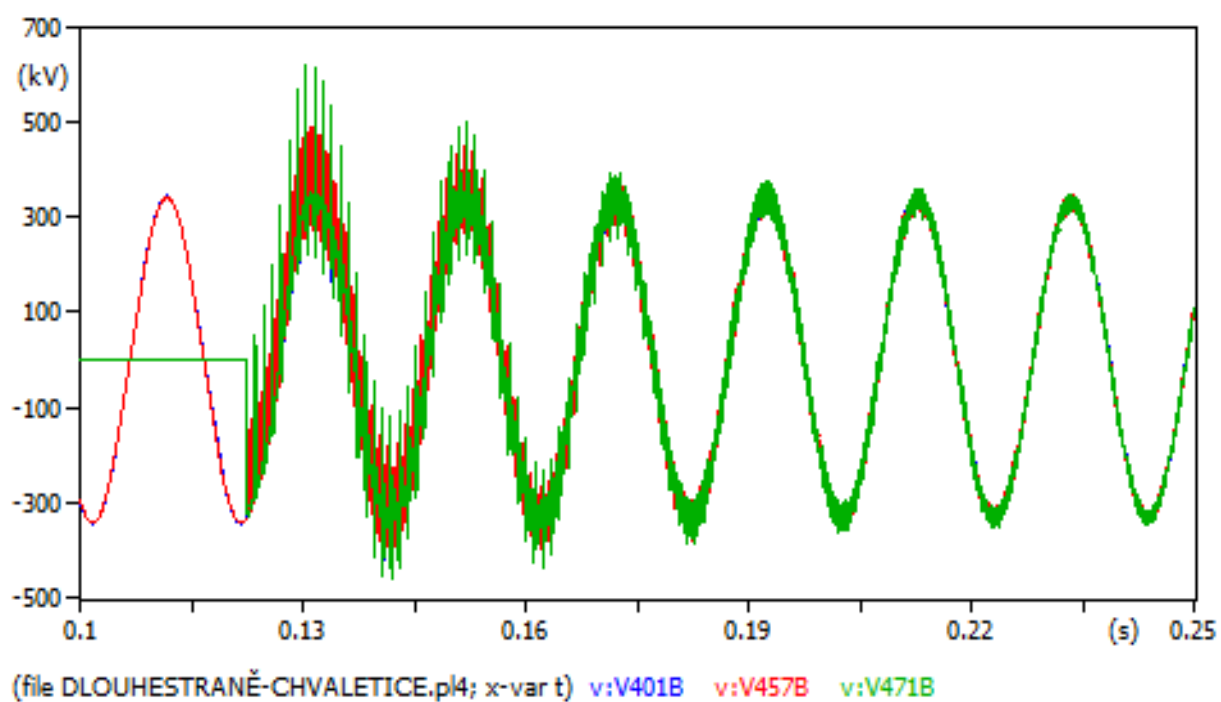
Stejně jako trasa VE Orlik - TE Chvaletice začíná i tato trasa s rozběhlým a nabuzeným synchronním generátorem a je pod napětím až po rozvodnu Týnec. V čase 0,125 s dojde k sepnutí vypínače v rozvodně Týnec. Tím dojde k připojení vedení V471 a zátěže reprezentující největší pohon, kterým je kouřový ventilátor tepelné elektrárny Chvaletic. V tento okamžik vznikne na všech vedeních přepětí, způsobené jevem ferorezonance. Ta nastala mezi přesyceným magnetickým obvodem zapínaného transformátoru, kapacitou vedení a reaktancí generátoru. Důležitým faktorem je taky okamžik sepnutí podle průběhu sinusového napětí. Na následujících průbězích napětí je vidět vliv ferorezonance.



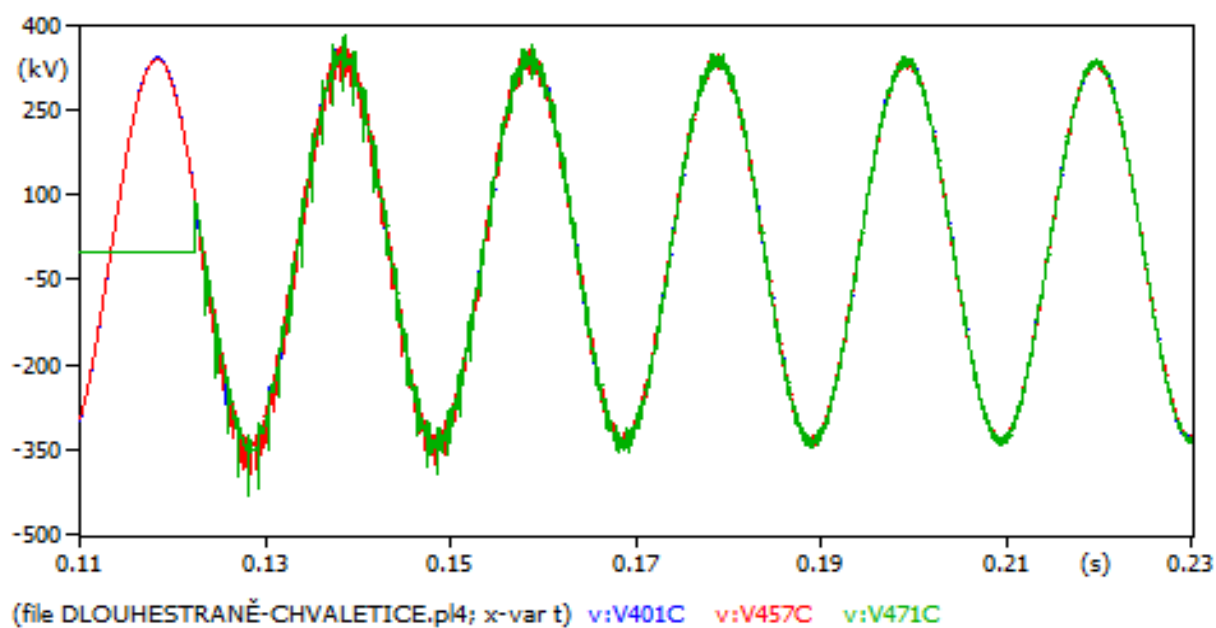
Obrázek 1.34: 3fázový průběh napětí na PVE Dlouhé Stráně



Obrázek 1.35: Průběh napětí 1.fáze na vedeních 400kV



Obrázek 1.36: Průběh napětí 2.fáze na vedeních 400kV

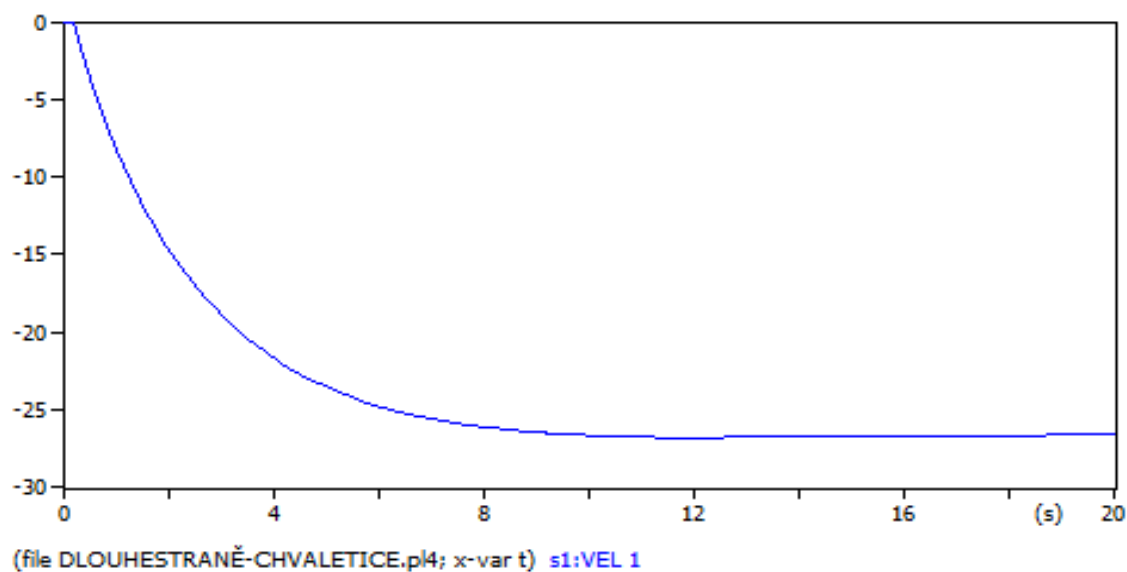


Obrázek 1.37: Průběh napětí 3.fáze na vedeních 400kV

Přepětí na generátoru PVE Dlouhé Stráně způsobené ferorezonancí dosahuje vyšších hodnot, než je 130% U_n , což je hranice pro sepnutí přepětíové ochrany, tudíž dojde k vybavení

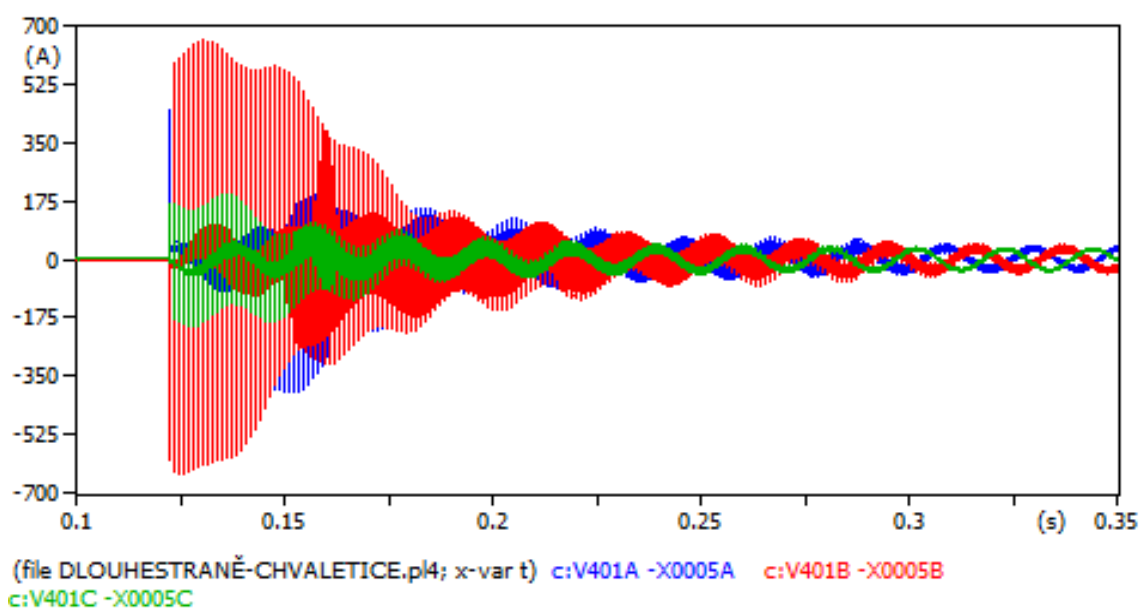
ochrany. Pokud by modelovaná trasa obsahovala budicí systém, pravděpodobně by přepětí trvalo delší dobu.

Největší zaznamenané přepětí se objevuje na první a druhé fázi vedení V471. Naopak na průběhu třetí fáze je vidět menší vliv ferorezonance, což je dáno polohou sinusového průběhu vůči nulové hodnotě napětí. U reálné zkoušky je toto přepětí omezováno a tlumeno svodiči přepětí, které toto přepětí pohlcují. Absorbovaná elektrická energie je přeměňována na tepelnou energii, která je mnohem větší, než na jakou jsou tyto svodiče přepětí dimenzovány, proto postupně dochází k degradaci svodičů přepětí.

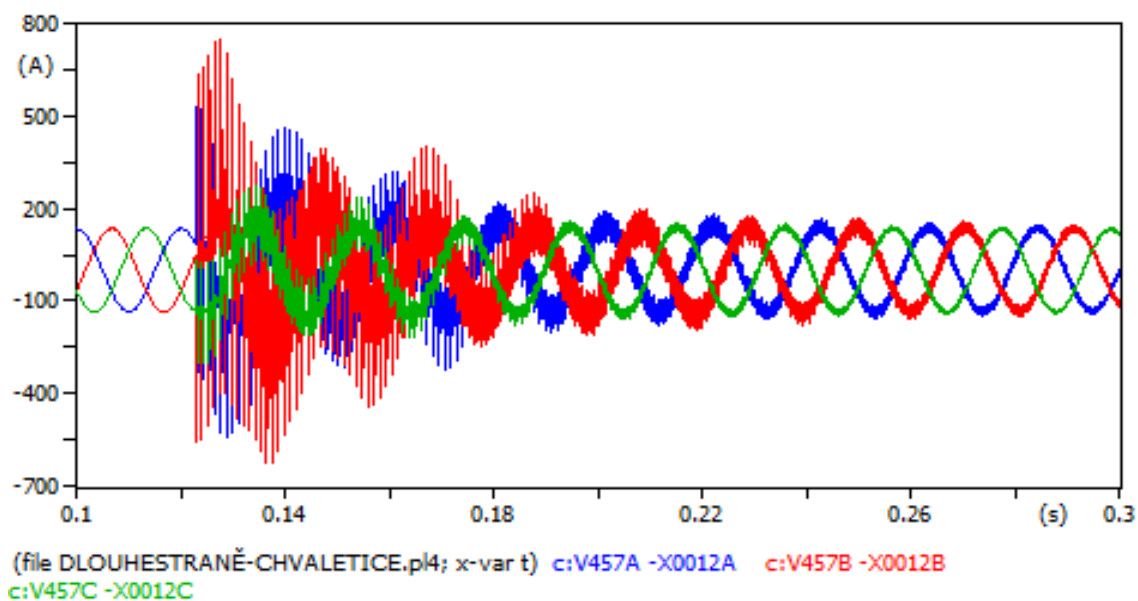


Obrázek 1.38: *Odchylka úhlové rychlosti generátoru VPE Dlouhé Stráně*

Zátěž reprezentující kouřový ventilátor v TE Chvaletice je stejně jako u předchozí trasy modelována jako činná. Dojde tedy k poklesu frekvence na generátoru VPE Dlouhé Stráně, a to na hodnotu $-26,7 \text{ rad/s}$, což odpovídá poklesu od základní frekvence 50 Hz na frekvenci $45,75 \text{ Hz}$.



Obrázek 1.39: Průběh proudu v rozvodně Týnec



Obrázek 1.40: Průběh proudu v rozvodně Krasíkov

Při zapnutí transformátoru dochází v jeho jádře vlivem nesymetrie magnetického toku k jeho přesycení, díky tomu zapínací proud transformátoru dosahuje v rozvodně Týnec a Krasíkov několikanásobku jmenovitého proudu. Zapínací proud pak během desetin sekund klesne vlivem tlumení a postupně se ustálí na hodnotě magnetizačního proudu.

Zareagování nadproudové ochrany je otázkou její nastavení. Zapínací proud má dostatečnou hodnotu na její vybavení odezví ovšem v poměrně krátké době.

7 Závěr

Tato diplomová práce se věnovala analýze tras obnovy přenosové soustavy pomocí simulace v programech MODES a ATP-EMTP. Obě trasy byly modelovány nejdříve v programu MODES pro sledování elektromechanických dějů a poté v programu ATP - EMTP.

Podání napětí z VE Orlík do TE Chvaletice je možné dvěma způsoby. První možností je nabuzení generátoru s připojenou nezatíženou trasou po rozvodnu Opočínec a následné připojení zbývajících částí trasy. Druhou možností je propojit celou trasu od VE Orlík po tepelnou elektrárnu Chvaletice s nenabuzeným generátorem, postupně zvyšovat buzení generátoru až na jmenovitou hodnotu napětí a poté připojit postupně všechny pohony vlastní spotřeby TE Chvaletic.

První způsob je realizovaný v programu ATP-EMTP. Z průběhu napětí na VE Orlík je patrný přechodový děj u první fáze, trvající 5 ms, který je způsoben pravděpodobně charakterem připínaného vedení se zátěží reprezentující pohon s největším výkonem, kterým je kouřový ventilátor. Tento přechodný jev se vyskytuje s největším rozkmitem na 2. fázi a to hlavně na připojovaném vedení V1133 na napěťové hladině 110kV. Ve všech rozvodnách je průběh proudu doprovázen při sepnutí kontaktů rázovými oscilacemi, které odezní během 30ms a neovlivní výrazně průběh obnovovací trasy. Tento způsob tedy můžeme použít pro start ze tmy.

Druhá varianta je modelována v programu MODES. Výsledkem simulace pro obnovovací trasu VE Orlík - TE Chvaletice je najetí trasy se všemi pohony vlastní spotřeby TE Chvaletic. Důležité jsou hlavně průběhy pohonů vlastní spotřeby s největším výkonem, což je kouřový ventilátor, napáječka a chladička. Průběh simulace je po celou dobu stabilní a splňuje meze odchylky frekvence, podpětíových ochran a přepětíových ochran. Největší záporná odchylka frekvence $\Delta f = 1,038$ Hz ve 317 sekundě, nastane při zapnutí kouřového ventilátoru, přičemž dovoleného záporného limitu 1,5 Hz nedosahuje. Maximální dovolená kladná odchylka je 0,5 Hz, tu ale nedosahuje žádný z pohonů, přičemž nejvyšší kladná odchylka nastane ve 187,75s s hodnotou 0,155 Hz. Podpětíová ochrana by zareagovala pouze v případě poklesu napětí pod 80% Un po dobu delší než 6 sekund. Nárůst napětí nad 112% Un po dobu delší 10 sekund či nárůst nad 130% Un nebyl zaznamenán, a tak ani přepětíová ochrana nesešla. Simulace podle očekávání dopadla úspěšně a tedy i tento způsob můžeme využít pro start ze tmy.

V případě obnovovací trasy PVE Dlouhé Stráně - TE Chvaletice jsou opět stejné dvě varianty podání napětí.

V programu ATP-EMTP byl namodelována první varianta. Nabuzení generátoru po rozvodnu Týnec s následným propojením vedení V471 a modelu zátěže s parametry odpovídající kouřovému ventilátoru, jakožto pohonu s největším výkonem vlastní spotřeby TE Chvaletic. Při tomto způsobu najíždění obnovovací trasy došlo při propojení celé trasy a zátěže k ferorezonanci. Ta má za následek přepětí na celé najížděcí trase, a především na vedeních 400kV. Největší přepětí dosahovalo velikosti přes 500 kV na 2. fázi u připojovaného vedení V471. Toto přepětí je omezeno a tlumeno svodiči přepětí. Ty během toho absorbují přepětí, což vede k jejich tepelnému namáhání, přetěžování a následně k degradaci. K destrukci může dojít ale až za normálního

provozu, kdy už nebude zřejmá spojitost s ferorezonancí. Proto tento způsob startu ze tmy není vhodný.

Druhá varianta je opět modelována v programu MODES stejně jako u první trasy. Kromě počátečního zvýšení frekvence způsobené přechodem regulátoru otáček do ostrovního režimu, je průběh připojování jednotlivých pohonů vlastní spotřeby TE Chvaletice stabilní a splňuje kritéria pro úspěšný rozběh. Největší pokles frekvence je zaznamenán u pohonu Napáječky kdy v 652. sekundě dojde poklesu o 293,8 mHz od základní hodnoty 50 Hz. Napětí je v rámci podpěťové a přepěťové ochrany v mezích, a tak nedojde k vybavení ochran, přičemž největší pokles je zaznamenán u připojení pohonu kouřového ventilátoru v čase 300 sekund na hodnotu 85% U_n . Simulace obnovovací trasy PVE Dlouhé Stráně - TE Chvaletice v programu MODES dopadla úspěšně a je tedy možné tímto způsobem provést start ze tmy.

Z výsledku simulace pro trasu PVE Dlouhé Stráně - TE Chvaletice se ukázala první varianta jako úspěšná. Proto by bylo vhodné toto tvrzení ověřit simulací v jiném simulačním programu či reálnou zkouškou. Pokud bychom chtěli sestavit tutéž trasu v programu ATP-EMTP musel by generátor obsahovat navíc budící systém. Pro reálnější model simulované trasy by bylo třeba zadat i magnetizační křivky zapínaného blokového transformátoru v tepelné elektrárně Chvaletice. Pro zjištění správnosti simulace obnovovacích tras by bylo zapotřebí dat z reálné zkoušky.

Z výsledných grafů napětí simulovaných obnovovacích tras v programu MODES můžeme pozorovat Ferrantiho jev. Na průbězích obrázek 1.23 a obrázek 1.36, kdy napětí na y-ose je v poměrných jednotkách, vidíme, že na začátku vedení ve VPE Dlouhé Stráně a VE Orlík je napětí nižší než na konci vedení v TE Chvaletice. Na těchto grafech je vidět pokles napětí v TE Chvaletice při postupném připojování jednotlivých pohonů v čase.

Použitá literatura

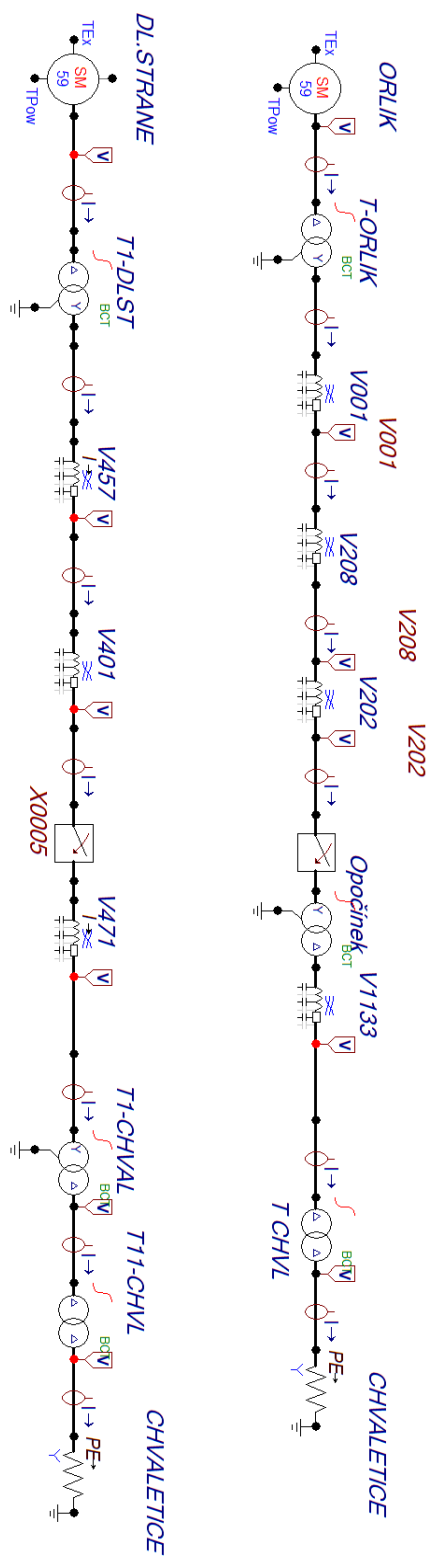
- [1] ČEPS A.S. Technická infrastruktura. Čeps [online]. [cit. 2018-12-11]. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/cs/technicka-infrastruktura>
- [2] ŠMÍD, Jakub. Česká přenosová a distribuční soustava – 1. díl: Elektrifikace a princip funkce [online]. 2015 [cit. 2018-12-11]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/elektrina/ceska-prenosova-a-distribucni-soustava-1-dil-elektrifikace-a-princip-funkce/>
- [3] ČEPS A.S. Vývoj přenosové soustavy. In: Čeps [online]. [cit. 2018-12-11]. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/cs/vyvoj-prenosove-soustavy>
- [4] MÁŠLO, Karel. Síťový simulátor MODES. In: Seminář ZČU [online]. Plzeň, 2015, s. 12 [cit. 2018-12-10].
- [5] NOHÁČ, Karel a Miroslav ŠAFÁŘÍK. ATP EMTP [online]. In: . s. 34 [cit. 2018-12-10].
- [6] HØIDALEN, H.K. ATPDraw [online]. [cit. 2018-12-10]. Dostupné z: <https://www.atpdraw.net/>
- [7] AMETANI, Akihiro, Naoto NAGAOKA, Yoshihiro BABA a Teruo OHNO. Power System Transients: Theory and Applications. Ilustrované vydání. CRC Press, 2013, 2013. ISBN 146657786X, 9781466577862.
- [8] KASEMBE, Adrew, Karel MÁŠLO a Zdeněk HRUŠKA. Obnova soustavy po poruše typu blackout [online]. [cit. 2018-12-10]. Dostupné z: <https://jenda.hrach.eu/f2/blackout.pdf>
- [9] ZEPPELIN CZ, s.r.o. Záložní zdroje pro blackstart: Firemní článek [online]. 2018 [cit. 2018-12-10]. Dostupné z: <https://energetika.tzb-info.cz/elektroenergetika/17460-zalozni-zdroje-pro-blackstart>
- [10] Zátěžové testy JE-ČEZ, a.s.: Ocenění bezpečnosti a bezpečnostních rezerv JETE [online]. 2011 [cit. 2018-12-10]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/file/energie-a-zivotni-prostredi/temelin/zaverecna-zprava-zt-ete.pdf>
- [11] ČEPS A.S. KODEX PŘENOSOVÉ SOUSTAVY: PRAVIDLA PROVOZOVÁNÍ PŘENOSOVÉ SOUSTAVY. Část II. Podpůrné služby (PpS) [online]. [cit. 2018-12-11]. Dostupné z: https://www.eru.cz/documents/10540/462808/Kodex+PS_revize+ČástII.pdf
- [12] ČEPS A.S. KODEX PŘENOSOVÉ SOUSTAVY: PRAVIDLA PROVOZOVÁNÍ PŘENOSOVÉ SOUSTAVY. Část V. Bezpečnost provozu a kvalita na úrovni PS [online]. [cit. 2018-12-11]. Dostupné z: <https://www.eru.cz/documents/10540/3727955/%C4%8CEPS+PPPS+%C4%8D%C3%A1st+V.pdf/>

-
- [13] Kolektiv autorů. Řízení a stabilita elektrizační soustavy. Praha: Asociace energetických manažerů, 2013. ISBN 978-80-260-44671-1.
- [14] HASE, Yoshihide. Handbook of Power System Engineering. West Sussex PO19 8SQ, England: John Wiley & Sons, 2007. ISBN 978-0-470-02742-4.
- [15] MÁŠLO, Karel. Popis modelování přechodných dějů v ES programem MODES 2.3/17 [cit. 2020-04-24].
- [16] KOČIŠ, Lubomír, Tomáš LINHART, Oldřich RYCHLÝ a Martin PISTORA. ENERGETIKA. 3/2018. ISSN 0375-8842

Seznam příloh

<i>Příloha A:</i>	<i>IV</i>
-------------------------	-----------

Příloha A:



Obrázek 1.41: Modely obnovovacích tras VE Orlik - TE Chvaletice a VPE Dlouhá Stráně - TE Chvaletice v programu ATP-EMTP